INVESTIGACION Y CIENCIA

Edición española de **SCIENTIFIC AMERICAN**



FACTORES DE EROSION

Mayo 1989

500 PTAS.

INVESTIGACION Y
CIENCIA

Mayo de 1989 Número 152

Edición española de **SCIENTIFIC AMERICAN**

SECCIONES

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Josep-Enric Llebot: *Los Estados Unidos en el espacio*; J. Rodríguez Villanueva: *Resistencia oncológica a múltiples drogas*; Ramón Pascual: *Aceleradores de partículas mediante plasma*; Juan P. Adrados: *Cristales macromoleculares*; Héctor Millán: *Modelización del ciclo geoquímico del carbono*; Manuel Ortega: *Biología de las obsesiones y las compulsiones*; A. Blanco Freijeiro: *Acueducto romano de Nîmes*; Luis Bou: *Juegos de ordenador*; J. Vilardell: *Taller y laboratorio*.

Ciencia y sociedad:

Josep-Enric Llebot

Ciencia y empresa:

Manuel Puigcerver

Libros:

Carlos Pajares, Rafael Alvarado, Agustín Albarracín y Luis Alonso

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Página	Fuente
8-9	Gabor Kiss
10	Johnny Johnson
11-13	Gabor Kiss
17-22	Ian Worpole
23	Grace Bradley, Instituto del Cáncer de Ontario y Universidad de Toronto
27-29	George V. Kelvin
30	John M. Dawson
31	George V. Kelvin (*arriba*); Thomas C. Katsouleas, Universidad de California (*abajo*)
32	George V. Kelvin
33	James D. Simpson, Laboratorio Nacional de Argonne
44-45	Jon Brenneis (*arriba*), Alexander McPherson (*abajo*)
46-47	Andrew Christie (*arriba*), Alexander McPherson (*abajo izquierda y derecha*), Jon Brenneis (*abajo centro*)
48	Alexander McPherson
49	Jon Brenneis (*arriba*), Alexander McPherson (*abajo*)
50-51	Alexander McPherson
55	B. J. Skinner, Univ. de Yale
56-57	Joe Lertola
58	Johnny Johnson
59-60	Joe Lertola
61	H. Hughs, Four By Five
65	Cortesía de la Galería Nacional Portrait, Londres
66	Johnny Johnson
67	Neil O. Hardy
68	Judith L. Rapoport
69	The Bettmann Archive
70	Neil O. Hardy
71	Judith L. Rapoport
73	ESA EARTHNET
74	Joaquín del Val
76-77	Walter B. Langbein, Stanley Schumm, Frederic Fournier, Ian Douglas, D. E. Walling, A. H. A. Kleo y Magda Màrìa
78-79	Joaquín del Val
80	M. G. Wolman y Magda Màrìa
81	D. E. Walling *et al.* y Magda Màrìa
82-83	Peter Frey, The Image Bank
84	Tom Prentiss
85	George F. W. Hauck
86-87	Tom Prentiss
88	G. F. W. Hauck (*izquierda*), Tom Prentiss (*derecha*)
91-94	Michael Goodman
96	Andrew Christie
97	Johnny Johnson



LA FOTOGRAFIA DE LA PORTADA muestra un suelo intensamente agrietado de la depresión de Guadix, en los aledaños del río Guadiana Menor (véase "Factores de erosión" por Joaquín del Val, en este número). En depresiones topográficas y en áreas llanas, el problema que puede plantearse es el de acumulación de materiales. Cuando el agua, portadora de sedimentos de tipo fango, desaparece de la superficie, los minerales arcillosos la retienen aún en gran cantidad. Si debido a una sequía prolongada se produce una intensa evaporación, el material se contrae, se agrieta y queda inutilizado, al menos temporalmente, para la agricultura.

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén
DIRECTOR EDITORIAL José María Valderas Gallardo
REDACCIÓN Purificación Mayoral Martínez
PRODUCCIÓN César Redondo Zayas
PROMOCIÓN EXTERIOR Pedro Clotas Cierco
EDITA Prensa Científica, S. A. Calabria, 235-239 - 08029 Barcelona (ESPAÑA)
Teléfono 322 05 51 Telefax 410 79 12

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR Jonathan Piel
BOARD OF EDITORS Armand Schwab, Jr., Managing Editor; Timothy Appenzeller, Associate Editor; Timothy M. Beardsley; John M. Benditt; Laurie Burnham; Elizabeth Corcoran; Ari W. Epstein; Gregory R. Greenwell; John Horgan; June Kinoshita; Philip Morrison, Book Editor; Tony Rothman; Ricki L. Rusting; Russell Ruthen, Karen Wright
PUBLISHER Harry Myers
ADVERTISING DIRECTOR Peter B. Kennedy
PRESIDENT AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER Claus-Gerhard Firchow
CHAIRMAN OF THE BOARD Georg-Dieter von Holtzbrinck
CHAIRMAN EMERITUS Gerard Piel

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Calabria, 235-239
08029 Barcelona (España)
Teléfono 322 05 51 ext. 33-37

Precios de suscripción, en pesetas:

	Un año	Dos años
España	5500	10.000
Extranjero	6200	11.500

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 500 pesetas
Extraordinario: 650 pesetas

- Todos los precios indicados incluyen el IVA, cuando es aplicable.
- En Canarias, Ceuta y Melilla los precios incluyen el transporte aéreo.
- El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

DISTRIBUCION

para España:

MIDESA
Carretera de Irún, km. 13,350
(Variante de Fuencarral)
28049 Madrid Tel.652 42 00

para los restantes países:

Editorial Labor, S. A.
Calabria, 235-239 - 08029 Barcelona
Teléfono 322 05 51

PUBLICIDAD

Madrid: Gustavo Martínez Ovín
Menorca, 8, bajo, centro, izquierda.
28009 Madrid Teléfonos 409 70 45 - 409 70 46

Cataluña:
Thaïs Muñoz Oliva
Muntaner, 467-469, 3° 3ª
08021 Barcelona
Teléfono 211 92 45



ISSN 0210-136X Dep. legal: B. 38.999-76

Fotocomposición: Tecfa. Línea Fotocomposición, S.A. Almogàvers, 189 - 08018 Barcelona

Fotocromos reproducidos por Tecfa, S. A. Almogàvers, 189 - 08018 Barcelona

Gráfica Elzeviriana, S. A. Nápoles, 249 - Tel. 207 40 11 - 08013 Barcelona

Printed in Spain - Impreso en España

Hace...

José M.ª López Piñero

...cien años

Francisco Quiroga publicó sus *Observaciones geológicas hechas en el Sáhara Occidental.*

Nacido en Aranjuez en 1853, Quiroga comenzó a relacionarse con la geología cuando era todavía un niño, acompañando en sus trabajos de campo a Casiano del Prado, amigo personal de su padre y una de las figuras iniciales de la brillante escuela geológica española del siglo XIX. Quiroga estudió farmacia y ciencias naturales en la Universidad de Madrid, pero su principal maestro fue José Macpherson, en cuyo laboratorio privado se formó en la micrografía aplicada a la investigación de la estructura cristalina de los minerales. Con esta técnica realizó importantes contribuciones que le dieron prestigio internacional cuando todavía era muy joven. En 1879 obtuvo una plaza de auxiliar de mineralogía en el Museo Nacional de Ciencias Naturales, donde trabajó principalmente en el estudio y clasificación de los minerales procedentes de la Expedición Científica del Pacífico (1862-1865). La importancia de su obra motivó que en 1888 se dotase en la Universidad de Madrid una cátedra de cristalografía, primera de la materia en Europa, que ganó por oposición y ocupó hasta su temprana muerte en 1894. Lo mismo que Macpherson, Quiroga estuvo estrechamente vinculado a la Institución Libre de Enseñanza, en cuyo *Boletín* publicó numerosos artículos de divulgación. La mayoría de sus trabajos de investigación aparecieron en los *Anales* de la Sociedad Española de Historia Natural, de la que fue miembro fundador.

Las *Observaciones geológicas hechas en el Sáhara Occidental* fueron el resultado de la participación de Quiroga en una expedición organizada por la Sociedad Española de Geografía Comercial "para explorar la región comprendida entre la costa occidental de Africa, desde Río de Oro a Cabo Blanco, y los Adrares en el interior". El presidente de dicha Sociedad era el cartógrafo Francisco de Coello y el director de expediciones, Joaquín Costa. Desde el 14 de mayo al 14 de agosto de 1866, esta expedición recorrió el territorio citado bajo la dirección del ingeniero militar Julio Cervera Baviera, que había destacado por sus estudios geográficos sobre Marruecos. Como entre sus fines figuraba "entablar relaciones con sus habitantes", llevaba como intérprete al diplomático y arabista Felipe Rizzo.

"Las investigaciones geológicas en el Sáhara –afirmó el mismo Quiroga– son difíciles e incompletas a causa del suelo, el clima y los habitantes. El suelo está más o menos cubierto de arenas, que ocultan a veces en grandes extensiones las formaciones geológicas infrayacentes, impidiendo precisar en muchos casos los contactos de unas con otras; el clima, por sus condiciones de temperatura y sequedad –sobre todo en la estación del año en que nosotros viajamos– obliga a caminar de noche la mayor parte del tiempo; y la más grande de todas las dificultades la constituyen los habitantes, que por su fanatismo y suspicacia, hijos de la ignorancia, se oponen resueltamente a todo lo que sea hacer observaciones, tomar notas y recoger ejemplares. En prueba de esto, diré que, a pesar de mi especial cuidado de hacerlo a sus espaldas, llegaron a enterarse de que yo recogía piedras, y nos prohibieron el paso desde el pozo Aussert hacia el O para visitar el Adrar Suttuf, diciendo que yo iba buscando oro y que nos abandonarían o algo más si avanzábamos en aquella dirección. Con pretexto de que *profanábamos con nuestra inmunda planta la tierra sagrada del Islam* (textual) no nos dejaron bajar hacia el S del pozo El Auiy, atravesando el Adrar-et-Tmarr, como era nuestra misión y deseo, no obstante ser *muy amigos* del Xej Ahmed Uld-el-Aídda a quien hicimos muchos regalos, que había mostrado gran deseo de vernos en su país y hasta nos hizo algunos obsequios.

"Por la salina de Ydyil nos paseó, muy desagradablemente por cierto, una tarde nuestro *íntimo amigo* –según él– Si El-Beschir, prometiendo llevarnos al sitio de donde extraían la sal, que al cabo no encontramos. En fin, que con los habitantes del Sáhara, se hace lo que a uno dejan hacer, y aún esto sufriendo vejaciones y con peligro constante de la vida."

La labor de Quiroga en esta expedición contribuyó decisivamente al conocimiento geológico de la zona y a rectificar los graves errores que sobre la misma circulaban hasta entonces. La correspondiente memoria incluye, entre otros materiales, un "Croquis geológico" que su autor comenta en los siguientes términos: "La constitución geológica de la porción del Sáhara occidental que ha visitado la Comisión española, es bastante sencilla, según puede verse rápidamente en el *Croquis geológico* que he trazado de dicha región, y acompaña a este trabajo, que, como el de todas las exploraciones análogas en aquellas tierras, no puede tener más que un valor aproximado, provisional, sobre todo en lo que se refiere a límites de los distintos grupos y sistemas geológicos. A los geólogos que posteriormente pasen por allí, toca confirmar lo que haya de cierto en mi trabajo, y corregir lo mucho que necesitará enmienda.

"En este pequeño mapa se nota inmediatamente que la parte central más alta, el núcleo de la porción septentrional del continente africano, está constituido por formaciones de origen interno, especialmente graníticas, y otras externas del grupo arcaico, acompañadas ambas de algunos depósitos de la era paleozoica. Los escalones que descienden hasta el mar los componen, según mi opinión actual, formaciones marinas y terrestres, pertenecientes a la era cuaternaria. En las noticias que publiqué de nuestro viaje en cuanto llegué a Madrid, consideraba los depósitos marinos de la costa como terciarios muy modernos, pliocenos, o cuando más miocenos; pero las investigaciones posteriores, de que luego daré cuenta, me han hecho variar de opinión, y estos depósitos de la costa, para mí hoy son cuaternarios.

"En resumen, en la parte de Sáhara occidental que he recorrido, existen depósitos de los grupos arcaico, paleozoico y cuaternario, así como formaciones eruptivas o de origen interno que alcanzan un gran desarrollo.

"No puedo menos de hacer constar aquí, que mis observaciones no están conformes con las consignadas por el intrépido viajero Dr. Oscar Lenz en su mapa geológico del Africa occidental, y que con posterioridad ha tenido en cuenta exclusivamente en esta región el

sabio profesor Dr. C. de Zittel, para la confección de su mapa geológico de Africa. Ya llamé la atención precedentemente acerca de la gran diferencia que existe entre la constitución geológica que el doctor Lenz supone a aquella parte del gran desierto africano, y lo que yo he visto. No volvería a hablar de esto, si el ilustre paleontólogo y profesor de Munic no hubiese admitido como cierta la estructura geológica que el Dr. Lenz supone al Sáhara occidental."

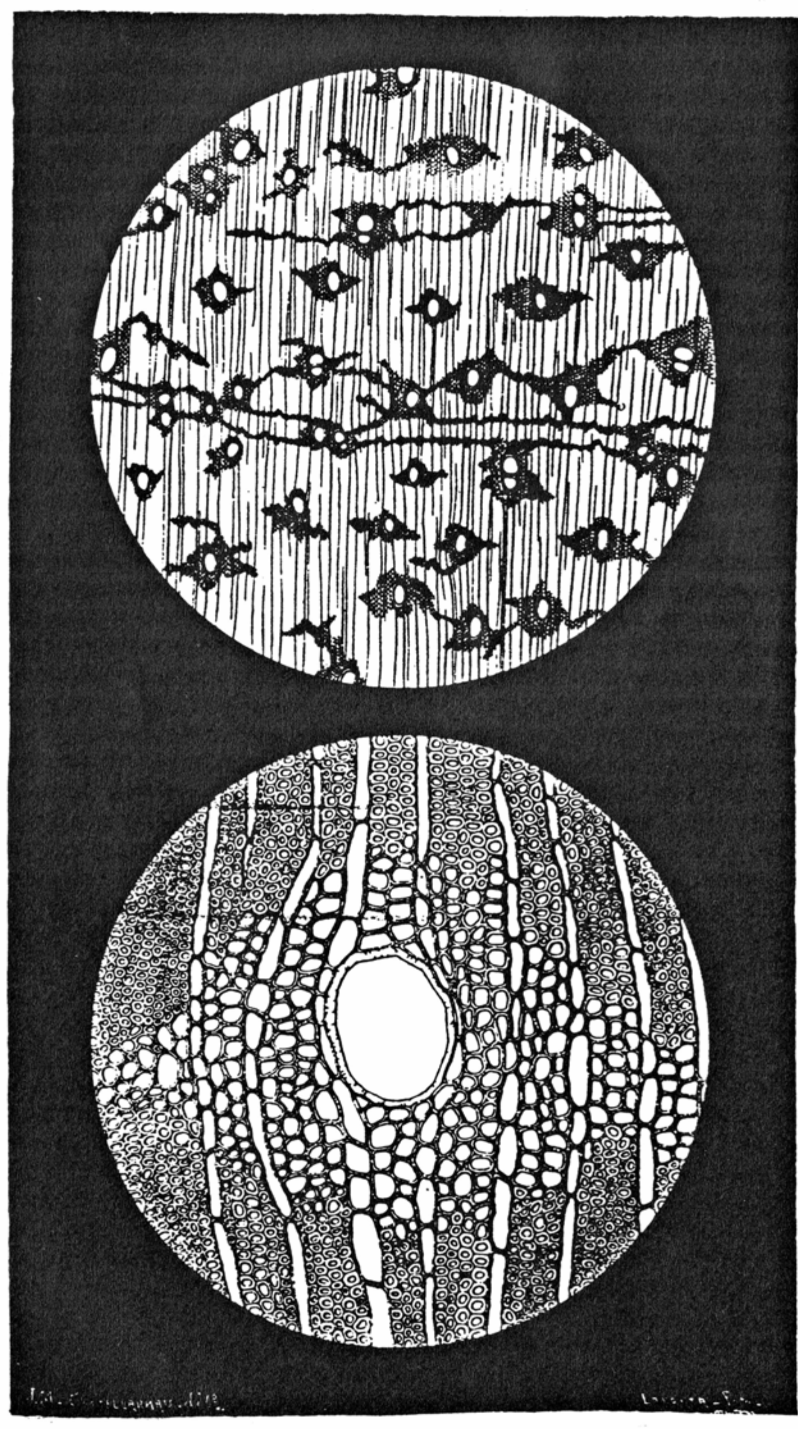
Uno de los hallazgos de Quiroga fue de carácter paleontológico: "En el horizonte de las areniscas ferruginosas en Huissi Aissa, existe gran cantidad de restos de troncos vegetales, muchos de tamaño considerable, como el que yo he traído, que mide 0,80 m × 0,76 m, fosilizados por la sílice, según demuestran las secciones delgadas que he preparado; troncos que, al menos el recogido por mí, pertenecen a vegetales muy próximos a las leguminosas del grupo de las *Caesalpineas*, según la autorizada opinión del sabio paleofitólogo profesor doctor A. Schenk, de Leipzig, que ha tenido la bondad de estudiar un fragmento del que yo recogí, denominándolo *Caesalpinioxylon Quirogoanum*, que, según me decía en su última carta, describirá muy en breve juntamente con otros vegetales fósiles también africanos.

"La existencia de semejantes fósiles en estas areniscas da al conjunto de estos depósitos una estrecha semejanza con los estudiados por el Sr. Thomas en Túnez, y que este geólogo refiere al plioceno. En efecto, en Uad Manura, como en Huissi Aissa, la base de esta formación la constituyen margas yesíferas que contienen *balanus* y *O. crassisima* en Túnez, mientras que en las de la costa del Sáhara occidental yo no he hallado fósil alguno, sobre las cuales yacen areniscas ferruginosas que poseen diseminados en todas direcciones troncos vegetales fosilizados por la sílice y el hierro, éste en menor cantidad que aquél, según las investigaciones del Sr. Fliche sobre los fósiles de Túnez, que concuerdan con las mías sobre los de Huissi Aissa. En éstos, la sílice forma esferolitas incompletas, todas de carácter positivo, por lo que la considero más como cuarzo que como calcedonia. Las esferolitas más perfectas están en los vasos y algunas tienen su centro en la pared de ellos."

El *Caesalpinioxylon Quirogoanum* no fue la única especie dedicada al geólogo español. Lucas Fernández Navarro, su principal discípulo, le dedicó la *quiroguita*, especie mineralógica nueva descubierta en España, y el gran entomólogo Ignacio Bolívar, el género *Quirognesia*, para un ortóptero recogido en el viaje.

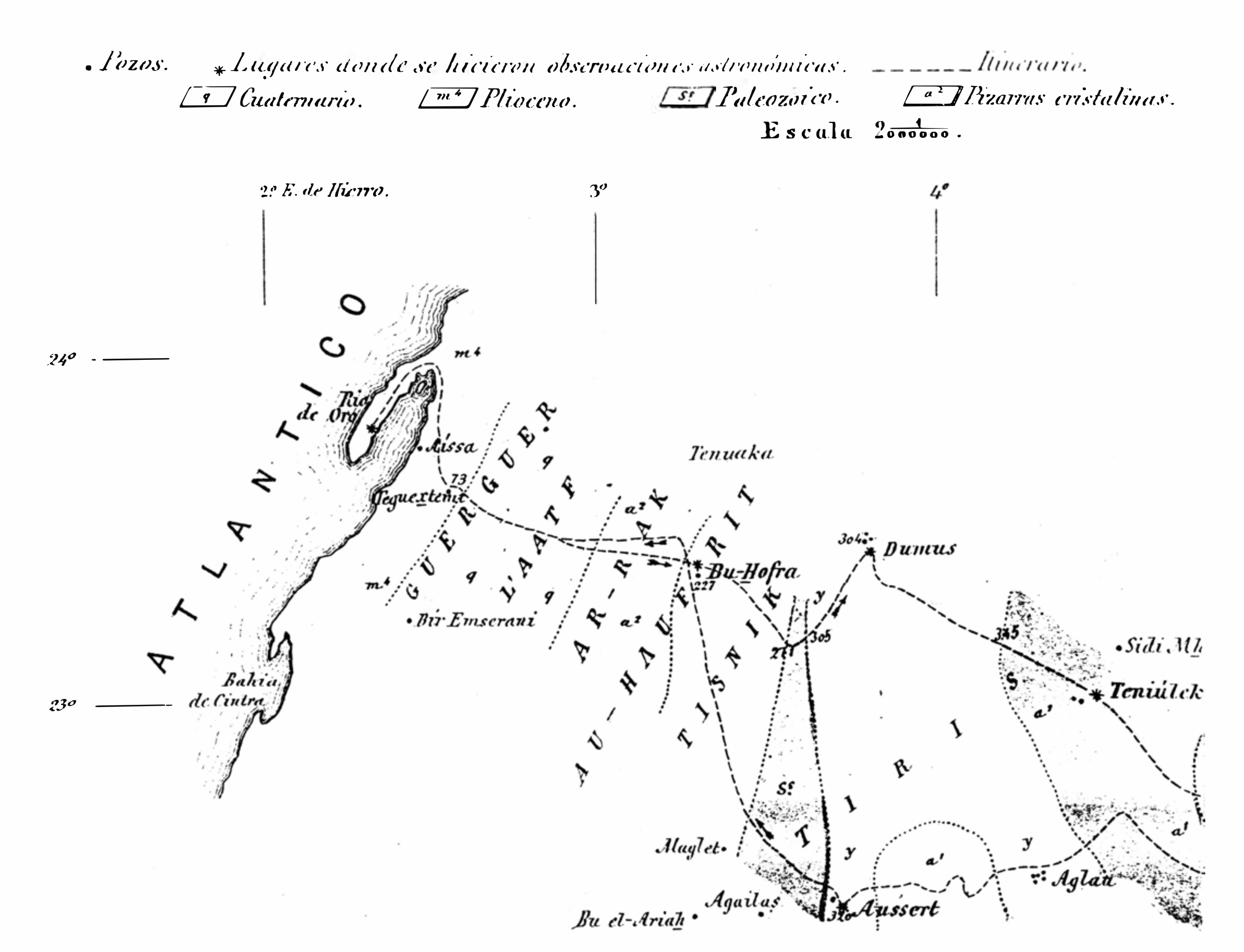
Una de las láminas de la memoria está dedicada al estudio microscópico de la madera fósil descubierta, que fue realizado por Joaquín María de Castellarnau, de cuya importante obra como paleontólogo vegetal ya tratamos anteriormente en esta sección: "La lámina representa la sección transversa de la madera fósil *Caesalpinioxylon Quirogoanum* Schenk, amplificada 15 y 65 veces. Los dibujos originales que han servido para su realización están dibujados con la cámara clara del profesor

Anales de la Soc. esp. de Hist. Nat. Tomo XVIII. Lám. VI.



Caesalpinioxylon Quirogoanum Schenk.

1. Estudio micrográfico de la madera fósil descubierta por Francisco Quiroga durante la expedición al Sáhara occidental (1886)



2. *Detalle del* Croquis geológico *que incluye la memoria de Francisco Quiroga sobre la geología del Sáhara occidental*

Abbe, a los aumentos de 25 y 100 respectivamente.

"La figura primera X 15 da una idea de su constitución histológica, y principalmente de la distribución relativa de los vasos y tejido celular en medio del tejido fundamental fibroso; y la segunda X 65 representa la sección de un grupo de parénquima paratraqueal rodeando un vaso, y atravesado por varios radios medulares. El tejido que se ve en todo su alrededor pertenece al fibroso fundamental.

"La disposición anatómica de los diversos tejidos componentes de esta madera ofrece grandes analogías con la de muchos árboles dicotiledones tropicales que viven en la actualidad. Los vasos son grandes, de paredes gruesas, con puntuaciones (¿aerolares?) muy pequeñas, siendo completa la perforación entre los elementos de una misma serie vertical. La sección transversa es elíptica, con el diámetro mayor dispuesto en dirección radial, oscilando entre 8 y 20 céntimos de milímetro; pero, por término medio, tiene 15; el espesor de las paredes es de 5 micras. Por lo común, los vasos están aislados, contándose unos 55 en cada 25 mm^2 de sección transversal; y se ven también algunas agrupaciones de dos, y más raras veces de tres. La reunión se efectúa siempre en sentido radial.

"Los vasos están siempre rodeados por un estuche de parénquima paratraqueal, formado por celdillas grandes y bastante alargadas, y en la sección transversal aparecen como manchas elípticas más o menos regulares –en otras preparaciones ofrecen un contorno algo más regular que en la que representa la figura X 15– tendiendo a alargarse en sentido tangencial, lo que hace que muchas de ellas sean afluentes y se continúen en bandas tangenciales, simulando, si se examinan con débil aumento, anillos anuales. Estos están muy poco marcados y en extremo borrosos, pues apenas se indican por bandas estrechas de parénquima, de dos a tres celdillas de espesor, que miden por término medio 83 céntimos de milímetro. Los vasos que entre ellas se encuentran son más pequeños...

"Los radios medulares son numerosos, delgados y de una sola celdilla de espesor, atravesando las masas de tejido fibroso y paratraqueal, y siendo tangentes a los vasos cuando con ellos se encuentran. Por término medio se cuentan en la sección transversal de 55 a 60 en cada 5 mm.

"El tejido fundamental está, al parecer, constituido exclusivamente por fibras leñosas; mas no se llega a la certeza de que no puedan ser celdillas fibrosas y aun traqueidas, pues el estado de mineralización en que se encuentran los ejemplares recogidos no permite ver con toda claridad los últimos detalles. En ellas no se nota aplastamiento radial alguno en el límite externo de las zonas anuales de crecimiento, carácter que casi siempre es muy notable en los árboles de nuestros climas, y que no se presenta en muchos de los que vegetan en las regiones tropicales."

Los espacios en gris
corresponden a publicidad
en la edición impresa

Los Estados Unidos en el espacio

Durante los próximos diez años, dependerán de la lanzadera y de los cohetes propulsores para su acceso al espacio. Antes de pensar en los propulsores del siglo XXI, habrá que establecer los objetivos del programa

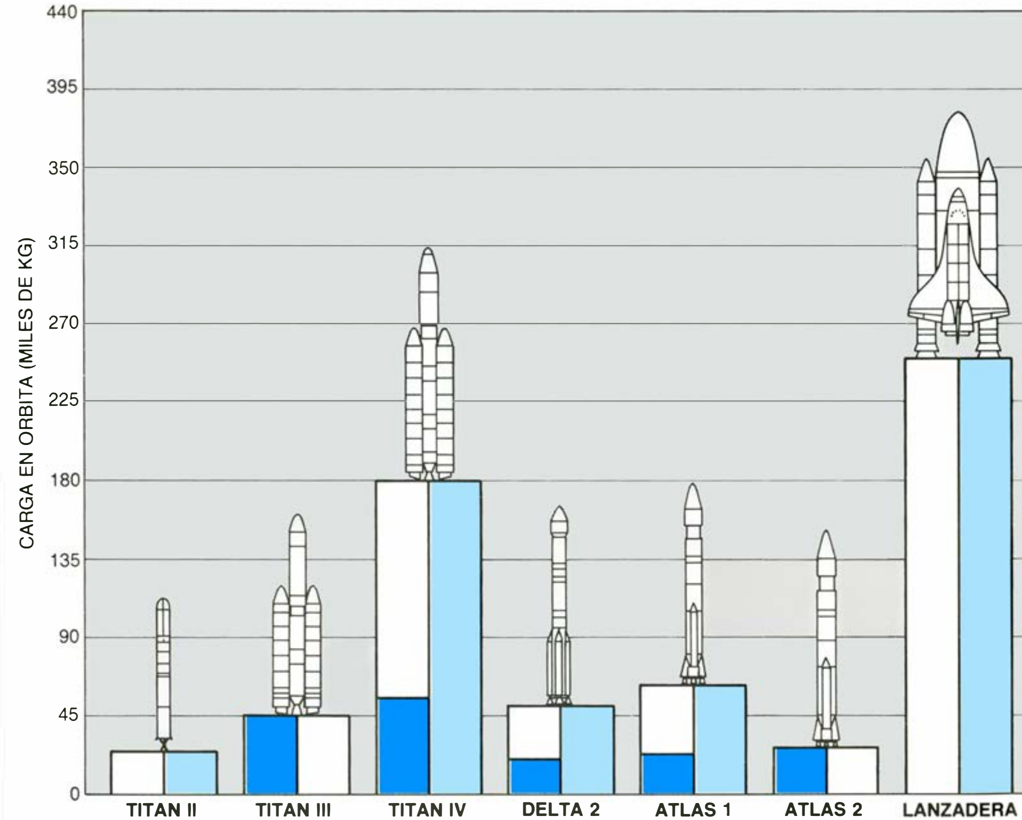
John M. Logsdon y Ray A. Williamson

Los Estados Unidos comienzan a salir de la crisis más grave en la historia de su programa espacial. El desastre del *Challenger*, ocurrido en 1986, con la suspensión subsiguiente de las misiones de los demás transbordadores, y los fracasos consecutivos en el lanzamiento de tres cohetes propulsores, cerraron, por casi tres años, el camino del espacio. Quedaron en cuarentena muchos proyectos espaciales científicos, militares y comerciales. La sonda Galileo, que había de introducirse en Júpiter, y el telescopio espacial Hubble duermen embalados, ante la indignación de los científicos por el retraso de su lanzamiento, calculado en unos cinco años. No se han sustituido tampoco los satélites imprescindibles para la seguridad nacional que han agotado ya su tiempo de vida útil. China y la Unión Soviética se han integrado en el consorcio europeo Arianespace de industria espacial, mientras las empresas norteamericanas del sector se lamentan de la falta de una política de su gobierno que les permita competir en ese mercado.

Aunque la lanzadera acaba de reanudar con éxito sus misiones y se dispone ya de cohetes propulsores, no se espera que, durante la próxima década, aumente sustancialmente la capacidad de transporte espacial de los EE.UU. Según un estudio reciente de la Asesoría Técnica del Congreso, no habrá, hasta finales de los noventa, ningún nuevo sistema de lanzamiento que incorpore avances técnicos espectaculares, ni se podrá sustituir el transbordador hasta el año 2005, si no más tarde. De acuerdo con este informe, si la demanda sigue igual que hoy y no se producen grandes fallos en los lanzamientos, bastarán los sistemas actuales para cubrir las necesidades del país. Pero conviene saber que cualquier proyecto que se aborde en la próxima década y que implique un aumento significativo de la actividad espacial estará limitado por la falta de sistemas de lanzamiento potentes, diversificados y asequibles.

La penosa situación actual débese al ingente error político cometido en los setenta, cuando las previsiones op-

JOHN M. LOGSDON y RAY A. WILLIAMSON estudian desde hace tiempo la política espacial de los EE.UU. Logsdon dirige el Instituto de Política Espacial de la Universidad George Washington, donde enseña política científica y relaciones internacionales. Se licenció en la Universidad Xavier y se doctoró por la Universidad de Nueva York. Se le llamó para formar parte de la comisión organizada por la Academia Nacional de Ciencias y por la Academia Nacional de Ingeniería para estudiar la política espacial del país. Williamson, que obtuvo su doctorado en astronomía por la Universidad de Maryland, pertenece a la Oficina de Asesoramiento Tecnológico (OTA) del Congreso de los EE.UU.



1. DE ESTOS PROPULSORES ESPACIALES dispondrán los gobiernos y las empresas privadas en la década de los noventa: dos lanzaderas reutilizables y varios cohetes propulsores de los EE.UU. (*azul*), la URSS (*rojo*), Europa (*morado*), China (*verde*) y Japón (*naranja*). Algunos cohetes lanzadores servirán sólo

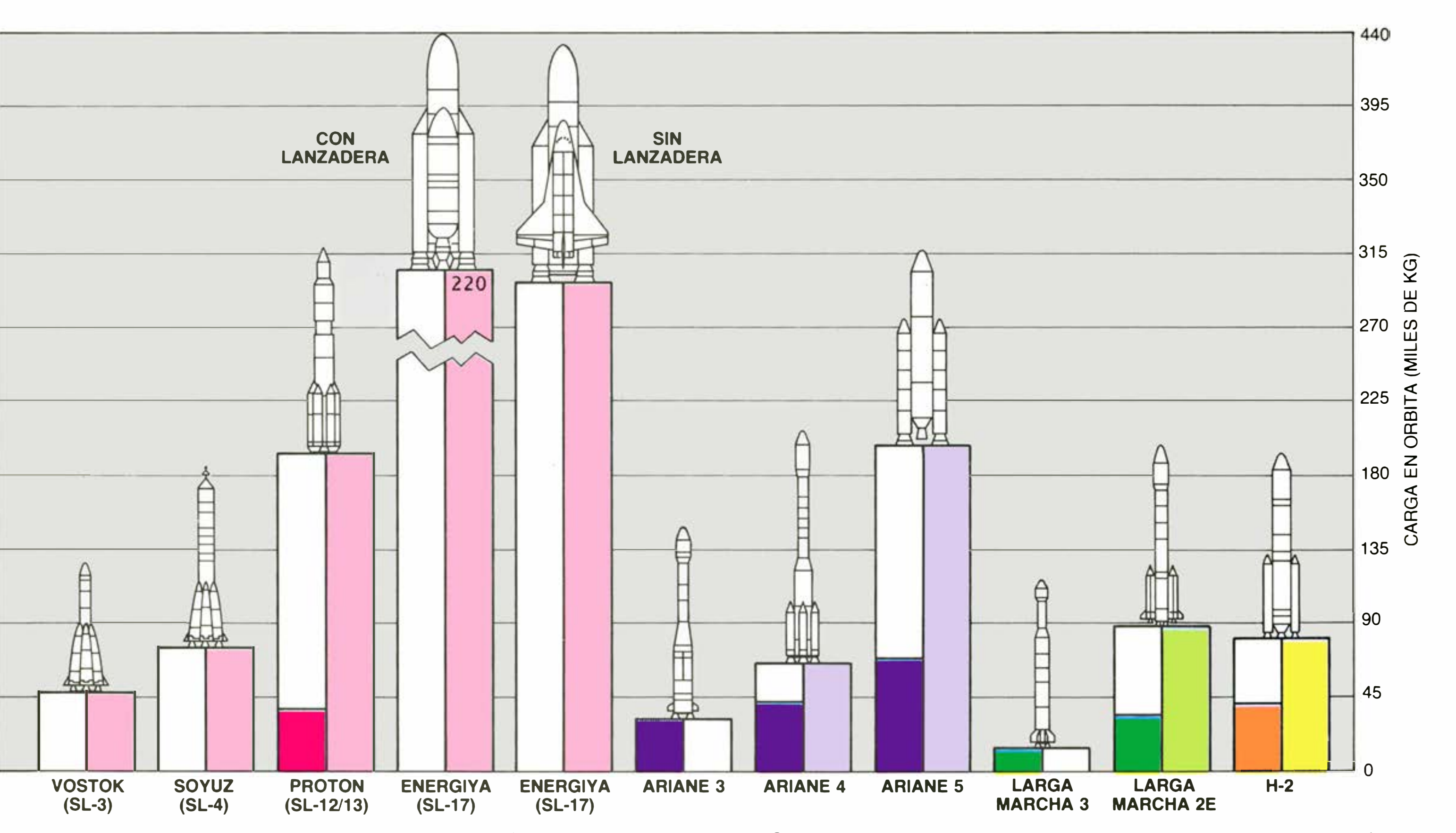
timistas sobre la capacidad y el coste del transbordador obligaron a que el acceso al espacio de todo el programa espacial americano dependiera de la lanzadera. Dicho de otro modo: desde 1972 hasta hace muy poco, no se han explotado los recursos del gobierno en otras técnicas ni en nuevas instalaciones de lanzamiento. (La rampa de lanzamientos del transbordador en la costa oeste, en la que se invirtieron más de 3500 millones de dólares, es una curiosa excepción, pues no se usará en el futuro y hoy se halla en situación de reserva.)

Añádase a lo anterior lo que ocurría a comienzos de los ochenta: para situar en órbita geoestacionaria satélites de comunicaciones empezaron a comercializarse con éxito los cohetes Ariane como vía alternativa de los sistemas de lanzamiento americanos; la administración convirtió entonces la lanzadera espacial en opción estadounidense dentro del mercado espacial. En 1985, los agentes de la NASA recorrían el planeta glosando las excelencias de la lanzadera, "el sistema de lanzamiento más flexible, fiable y rentable del mundo", y asegurando a los clientes potenciales la imposibilidad de conseguir en el mercado precios mejores. El precio de los servicios de la lanzadera era, en verdad, artificialmente bajo, ya que su coste se había establecido para atraer a los clientes norteamericanos. La iniciativa mercantilista gubernamental bloqueó los intentos de la empresa privada por comercializar sus propios cohetes y obligó a suspender la producción de vehículos espaciales: el panorama se cernió de nubes, no sólo en lo referente a los pedidos de su propio gobierno, sino también en lo relativo a los contratos con gobiernos extranjeros y con compañías privadas.

Al interrumpir los vuelos del transbordador después del desastre del *Challenger*, los EE.UU. se encontraron sin ningún sistema alternativo de lanzamiento disponible. Han tenido que transcurrir tres años para que vuelva a entrar en acción la lanzadera y para que se restablezca la producción de otros cohetes propulsores. Pero pasará mucho más tiempo antes de que se establezcan las bases técnicas que apuntalen los futuros sistemas.

El Departamento de Defensa de los EE.UU. ha avanzado en sus planes que le aseguren diversos sistemas de lanzamiento en los años noventa, pero la NASA continuará dependiendo en buena medida de la lanzadera. Ante las limitaciones presupuestarias y el decidido empeño en mantener el programa de la estación orbital en los plazos previstos, la NASA pretende dejar a la lanzadera el transporte de los componentes de la estación y convertirla en el principal medio de reavituallamiento y transporte de la tripulación. No es buena medida, desde el punto de vista estratégico, que el programa civil de investigación espacial dependa en exclusiva del transbordador, ya que la regularidad y la seguridad de este sistema de transporte podría verse perturbada en el futuro o hallarse con problemas que indujeran a abandonar el proyecto.

Los EE.UU. cuentan con una amplia flota de cohetes [*véase la figura 1*], capaz de poner en órbita baja alrededor de la Tierra (entre 160 y 800 kilómetros de altura sobre la superficie terrestre) cargas comprendidas entre los 2000 y los 25.000 kilogramos, y en órbitas geoestacionarias (35.000 kilómetros), cargas desde 500 hasta 5500 kilogramos. Hasta ahora, las necesidades de transporte, de la administración y la empresa privada, se han acomodado a esas cifras. (Algunas compañías están desarrollando elementos propulsores específicos, con capacidad de transporte de cargas menores que las citadas, convencidas de que en el futuro se utilizarán satétiles menos pesados; no nos



para colocar satélites en órbita geoestacionaria (*color oscuro*), introducir el satélite en una órbita circular y ponerlo en un punto situado a 35.000 kilómetros de la Tierra, de suerte que el ingenio permanezca siempre sobre la misma zona.

Otros cohetes propulsores se utilizarán para colocar cargas en órbitas bajas (*color claro*). (Las cargas se han calculado para órbitas bajas circulares, entre 190 y 250 km.) Algunos vehículos pueden cumplir ambos objetivos.

podemos ocupar aquí de ellos.) Si el ritmo de producción proyectado se mantiene, la capacidad anual de lanzamiento de la flota de cohetes norteamericanos durante los noventa rondará los 400.000 kilogramos. Si se compara esta cifra con los 270.000 kilogramos de 1985, infiérese que, al menos globalmente, la capacidad de lanzamiento se mantiene.

Los tres cohetes propulsores, Delta, Atlas y Titán, surgieron del desarrollo de los misiles balísticos durante la década de los cincuenta y comienzos de la siguiente. Desde entonces, han sufrido importantes modificaciones y las versiones actuales han alcanzado ya los límites de capacidad definidos en su diseño. El principal usuario de estos cohetes propulsores durante la próxima década va a ser el Departamento de Defensa; tiene encargados 11 Atlas 2, 14 Titán II, 20 Delta 2 y 23 Titán IV, con un importe de 6300 millones de dólares. Se espera que, en breve, el Departamento cierre el contrato de nuevos encargos, dada su intención de mantener en reserva algunos cohetes.

SI LOS EE.UU. QUIEREN	LOS EE.UU. DEBEN
limitar el crecimiento de los programas espaciales de la NASA y del Departamento de Defensa.	mantener los sistemas actuales de lanzamiento y limitar los gastos en el desarrollo de los sistemas del futuro. La capacidad actual es adecuada para mantener los niveles de la actividad espacial norteamericana.
instalar una estación espacial a mediados de los años 90 y mantener un ambicioso programa científico de la NASA,	consolidar el proceso de innovación de la lanzadera espacial (propulsores avanzados de combustible sólido y líquido) y la lanzadera-C (vehículo automático de transporte). El transbordador puede transportar los componentes de la estación espacial, pero lo hará mejor si se modifica su diseño o si opera en sintonía con un vehículo de transporte de carga pesada.
enviar el hombre a Marte o establecer una base lunar,	desarrollar un vehículo de transporte automático (la lanzadera-C o el sistema ALS) y afianzar el sistema AMLS y el Avión Aeroespacial Nacional; el compromiso de un vuelo pilotado implicará la retirada de la lanzadera espacial a finales de siglo.
continuar con el lanzamiento de satélites de carga creciente y seguir con un programa resuelto de pruebas en la Iniciativa de Defensa Estratégica,	desarrollar un vehículo de transporte sin tripulación basado en la tecnología actual para mediados o finales de los 90. En teoría, los sistemas de lanzamiento pueden abrirse y cubrir las necesidades futuras; ahora bien, un sistema nuevo sería, probablemente, más fiable y su utilización más barata.
desplegar un sistema de defensa estratégica espacial,	desarrollar un vehículo de transporte de carga automático, como el ALS. Los sistemas de lanzamiento actuales no son fiables para esta tarea, ni baratos.
mantener el liderazgo tecnológico en los sistemas de lanzamiento,	fomentar los estudios sobre transporte espacial. Para mantener una posición puntera se requiere el desarrollo de un programa integrado entre la NASA y el Departamento de Defensa que incluya diversas opciones técnicas. Deben compaginarse los esfuerzos de desarrollo con investigación básica.
mejorar la capacidad de recuperación después de un fallo en el sistema de lanzamiento,	mejorar la fiabilidad de los sistemas de lanzamiento existentes o desarrollar un nuevo vehículo, más capaz y seguro, amén de renovar las instalaciones terrestres. Si se prevé una agenda de viajes muy apretada quizá resultara más económico optar por un nuevo vehículo.
consolidar la fiabilidad y la seguridad de los vehículos de lanzamiento,	mejorar la fiabilidad de los subsistemas, su redundancia y tolerancia a los fallos; avanzar en la posibilidad de abortar misiones e interrumpir el funcionamiento de motores de cohetes.
reducir el impacto ambiental provocado por un número elevado de misiones,	limitar el uso de combustibles líquidos tóxicos y substituir los motores de combustible sólido de la lanzadera y del Titán por nuevos motores de combustible líquido o por propulsores de combustible sólido más limpios.

2. OBJETIVOS POSIBLES de un sistema de transporte espacial de los EE.UU. y pasos necesarios para conseguirlos, según un informe reciente de la oficina de asesoramiento tecnológico (OTA) del Congreso. Las recomendaciones, resumidas, dependen de las metas que se proponga el Gobierno en política espacial.

Se aparta así del proyecto de los años setenta por el que Defensa se comprometía a utilizar exclusivamente la lanzadera de la NASA para el transporte de carga espacial. (Pero ya en 1985, antes del accidente del *Challenger*, la Fuerza Aérea persuadió a la Casa Blanca de la necesidad de disponer de un sistema de lanzamiento en reserva, al menos para las cargas cruciales para la seguridad nacional, y contrató el desarrollo del cohete Titán IV.)

Tampoco puede decirse que el Departamento de Defensa no aprovechará la lanzadera espacial durante los próximos años. Hay cargas concernientes a la seguridad nacional, proyectadas antes de 1986, que aguardan, desde el desastre del *Challenger*, a que la lanzadera, la única capaz, las ponga en órbita. A largo plazo, sin embargo, Defensa no quiere depender de sistemas de lanzamiento cuyo desarrollo no controle. El uso militar del transbordador, entre 1995 y 2000, se limitará a dos misiones por año, las únicas que se acomodarán a las posibilidades específicas de la nave. Por ironía del destino, se reserva la lanzadera a un puesto de recambio en caso de que falle el sistema Titán IV, adoptado por Defensa para el lanzamiento de cargas pesadas durante los años noventa. Una decisión que, por otro lado, tampoco está exenta de riesgos, ya que el Titán IV es un sistema sin rendimiento comprobado.

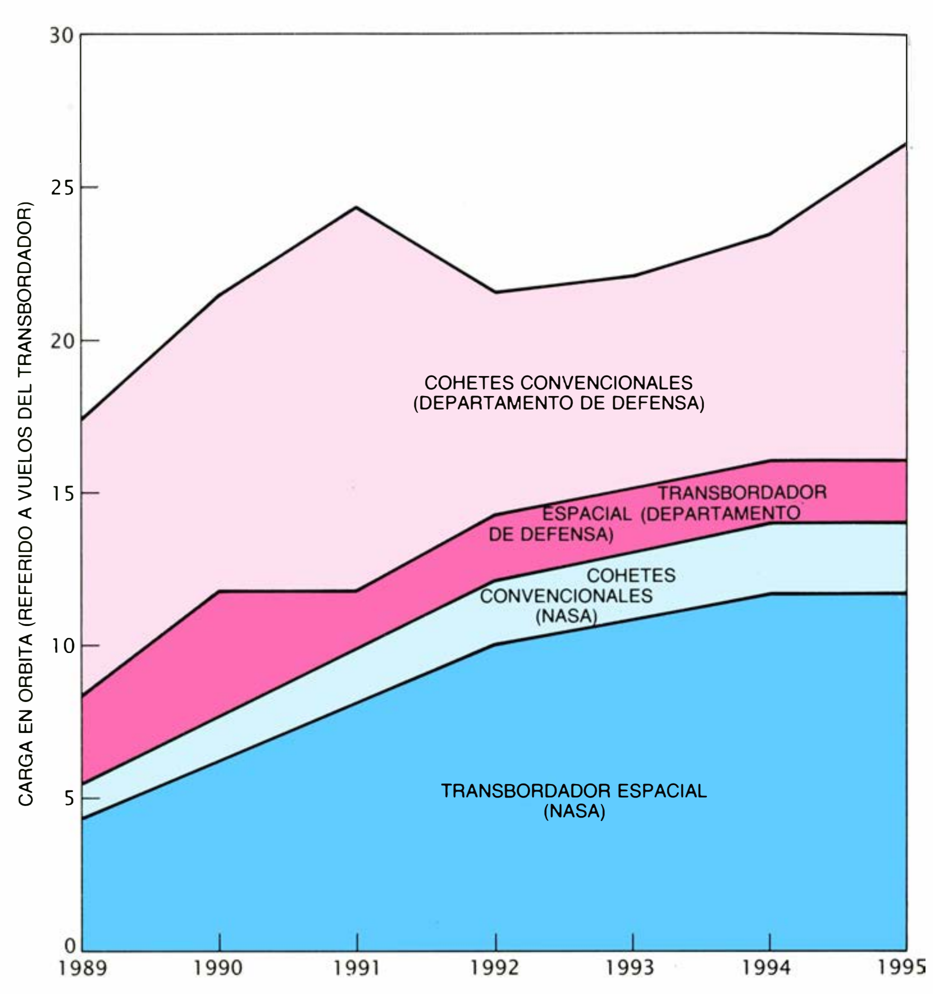
¿Qué supondrá para la lanzadera, en el terreno de lo civil, la década de los noventa? Aunque el éxito del *Discovery*, en septiembre de 1988, fue un balón de oxígeno que alivió la carga psicológica que pesaba sobre el programa de la lanzadera, la frecuencia y la fiabilidad de los lanzamientos de la flota de tres lanzaderas, y su coste, seguirán siendo objeto de debate varios años más. La suerte del programa civil gubernamental depende, en buena medida, de la resolución de esos puntos. Mientras tanto, el ritmo de avance de la ciencia y de la tecnología espacial norteamericana se hallará escrito en el agua.

El programa de la NASA para el ejercicio 1989-1990, elaborado en enero de este año, contempla 16 misiones de la lanzadera y siete lanzamientos de cohetes propulsores, sin contar los lanzamientos del Scout (cohete pequeño); para el período 1989-1994 se prevén 60 lanzamientos del transbordador. El cumplimiento de este calendario someterá a prueba la fiabilidad del programa de la lanzadera. Después de que se incorpore en el programa una cuarta

lanzadera en 1992, la NASA prevé un ritmo de 12 a 14 vuelos por año. Sin embargo, según algunos observadores, es más real suponer que se realizarán de ocho a diez misiones anuales. Lo que no admite dudas es el alto coste de la lanzadera. A pesar de la dificultad que entraña establecer el coste exacto de cada lanzamiento, suele cifrarse entre 250 y 500 millones de dólares, oscilación que depende del número de misiones anuales.

Los usuarios potenciales de la lanzadera aumentarían si recibiera ciertas mejoras técnicas. En la actualidad, el tiempo de permanencia en órbita del vehículo espacial es, a lo sumo, de nueve días. La tripulación invierte uno en aclimatarse a las condiciones de ingravidez y otro en preparar la nave para el retorno a la Tierra; queda, pues, poco tiempo para trabajar en los experimentos programados. Si se modificara una o dos lanzaderas, al objeto de que el tiempo de actividad se prolongara hasta 16 días, se mejoraría notablemente la capacidad de la nave para realizar experimentos en el espacio, por ejemplo, en microgravedad.

Hay que incrementar también el peso de la carga que es capaz de poner en órbita la lanzadera. Preveía el proyecto inicial que las lanzaderas transportaran hasta 30.000 kilogramos de carga, pero las modificaciones introducidas después del accidente del *Challenger* han reducido la carga hasta 25.000 kilogramos. Si se reemplazan los propulsores actuales de combustible sólido por otros más potentes, la carga máxima transportable puede llegar hasta los 31.000 kilogramos. Los técnicos de la NASA opinan que este refuerzo de su capacidad de carga bastará para transportar los componentes de la estación espacial. De hecho, se han programado, entre 1995 y 1998, 20 vuelos de la lanzadera con este fin.



3. VUELOS ESPACIALES planeados por el Departamento de Defensa (*rojo*) y por la NASA (*azul*): difieren en el tipo de vehículo propulsor. Mientras los sistemas propulsores de Defensa han cambiado hacia los cohetes propulsores convencionales (*color claro*), la NASA continúa confiando en la lanzadera espacial (*oscuro*).

Ese persistente apoyo de la NASA en la lanzadera y su mantenimiento como vehículo principal ha sido objeto de crítica por muchos observadores del programa civil de investigación espacial. En general, la comunidad científica discrepa de que los proyectos de misiones espaciales pasen por la lanzadera, ya que las misiones tripuladas añaden costos y complican su logística, sin que aparezcan ventajas de fiabilidad o rendimiento. Los científicos llevan tiempo insistiendo en que la NASA use cohetes propulsores distintos de la lanzadera, especialmente para misiones planetarias, cuyo lanzamiento depende de unas fechas muy concretas que, si por algún motivo no se aprovechan, representan un año o más de espera, hasta que se den de nuevo las condiciones apropiadas. (Haciéndose eco de estas preocupaciones, la agencia espacial norteamericana ha cambiado su decisión inicial de utilizar la lanzadera por la de un propulsor Titán III en la misión Mars Observer, programada para 1992; sin embargo, las sondas espaciales *Magellan* y *Galileo* —con destino respectivo a Venus y a Júpiter— saltarán al espacio desde el transbordador, a lo largo del año en curso.)

Algunos observadores han criticado también la decisión de la NASA que convierte al transbordador en el único sistema de lanzamiento utilizado para poner en órbita los componentes de la estación espacial. ¿Qué ocurriría, se preguntan, si se produjera otro fallo que obligara a suspender los vuelos de la lanzadera en el momento de ensamblaje de la estación o en el momento en que haya entrado ésta en servicio? Aun cuando la lanzadera sea fiable en un 99 por ciento, un sencillo análisis estadístico nos demuestra que pueden darse las circunstancias que provoquen un fallo grave en cualquiera de las próximas 75 misiones. Una vez que la estación espacial entre en servicio, habrá que considerar métodos alternativos de transporte de las tripulaciones y de los avituallamientos para mantenerla en constante funcionamiento. Por si acaso, se está estudiando la posibilidad de que estas misiones se realicen con propulsores convencionales.

Sería muy útil, por otro lado, disponer de un cohete propulsor, capaz de elevar cargas pesadas, que transportara al espacio los módulos de la estación espacial; llegados allí, serían ensamblados por los astronautas de la lanzadera. Por desgracia, no existe hoy ningún cohete que realice misiones de este tipo. Los ingenieros de la NASA adscritos al centro Marshall de vuelo espacial han sugerido el desarrollo de un propulsor con estas características mediante la construcción de un vehículo automático, basado en los motores de combustible sólido de los propulsores del transbordador y dotado de un depósito externo de combustible. La lanzadera-C, nombre dado al ingenio, transportaría un vehículo de carga sin especial

refinamiento. Los impulsores de la idea de la lanzadera-C estiman que este vehículo podría entrar en servicio el año 1994; siempre según sus cálculos, pondría en órbita cargas de 45.000 hasta 68.000 kilogramos.

El desarrollo de la lanzadera-C, según cálculos de esas fuentes, costaría 1500 millones de dólares. Ahora bien, cuatro viajes de un vehículo de estas características, durante la construcción de la estación espacial, reduciría el número de misiones de la lanzadera en más de la mitad. Además, dado que la lanzadera-C podría transportar al espacio módulos premontados, se economizaría también, de forma sustancial, el trabajo que los astronautas realizan fuera de la estación, rebajando el riesgo de las misiones. Se piensa en otras misiones potenciales que podrían dejarse a la lanzadera-C: envío de grandes sondas del sistema solar, así como transporte de nuevos módulos de la estación espacial y de plataformas experimentales en el marco de la Iniciativa de Defensa Estratégica.

Aunque la NASA relaje su dependencia de la lanzadera para acometer sus programas, incluya otro tipo de cohetes propulsores (secundando el ejemplo del Departamento de Defensa) o desarrolle un sistema de lanzamiento para el transporte de cargas pesadas (como la lanzadera-C), en el programa espacial de la agencia no existe una alternativa ambiciosa. La Casa Blanca y el Congreso se han resistido a aportar recursos para el desarrollo de un nuevo cohete propulsor; en el mismo sentido, la cúpula directiva de la NASA y el Departamento de Gestión y Recursos se han negado a añadir el coste del desarrollo de un cohete propulsor de cargas pesadas al ya de por sí apretado presupuesto de la NASA.

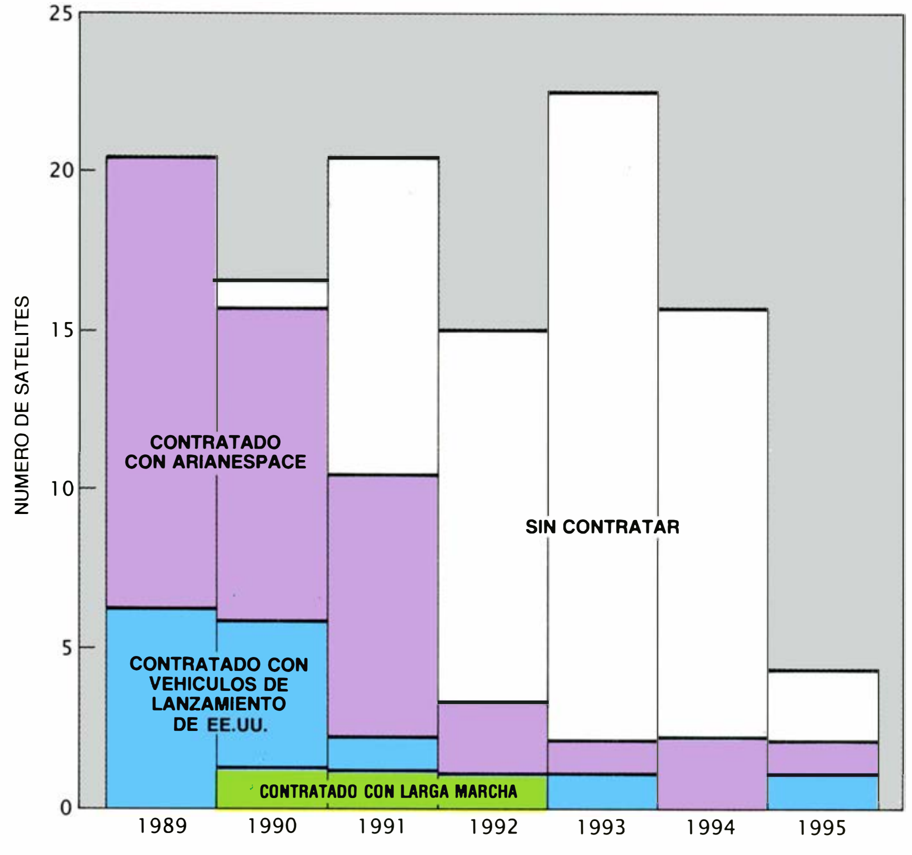
Los expertos discrepan de la actual política norteamericana de transporte espacial para usos civiles. La sustitución del transbordador por cohetes propulsores cuando sea posible, aunque incremente en principio la fiabilidad del programa, resulta costosa y quizá superflua si el rendimiento que alcance la lanzadera después del *Challenger* corrobora que se trata de un sistema regular y fiable. Pero si la lanzadera no satisface las esperanzas depositadas en ella, el liderazgo de los EE.UU. en el campo de la exploración y la explotación espacial quedaría en entredicho. La revisión del programa de transporte espacial de la próxima década, en el sentido de otorgar mayor protagonismo a los cohetes propulsores "convencionales", no sólo en el campo militar sino también en el civil, podría ser necesaria si se quiere conservar un lugar puntero en la investigación del espacio.

Aunque el gobierno de los EE.UU. va a ser, durante la próxima década, el máximo usuario de las instalaciones de lanzamiento hacia el espacio, habrá, simultáneamente, una demanda global significativa de esos viajes desde el sector privado. Las estimaciones acerca de la magnitud del mercado de los viajes comerciales, aunque variadas, coinciden en aproximarla en torno al millón de dólares por año. Este mercado está ahora abierto a los constructores de cohetes, McDonnell Douglas, General Dynamics y Martin Marietta, ya que el principal obstáculo ha desaparecido: después del accidente del *Challenger*, la administración Reagan dio un giro en su política e impidió que la NASA usara la lanzadera compitiendo en contratos comerciales.

Las implicaciones económicas de la industria espacial, en su apartado de viajes, no son despreciables: cada contrato de lanzamiento se cifra entre 40 y 60 millones de dólares. De acuerdo con algunas prospecciones de mercado, hay unos 58 contratos pendientes de asignación a un servicio de lanzamiento determinado, lo cual significa que quedan por adjudicar unos 3000 millones de dólares.

Antes de que las compañías norteamericanas puedan ofrecer sus servicios de lanzamiento espacial, habrán de determinar el acceso a los contratos gubernamentales, analizar los medios de seguridad y de seguimiento disponibles y establecer los seguros de riesgo de las instalaciones y las responsabilidades con terceras partes, amén de resolver otras cuestiones de parejo tenor. Durante más de dos años, el Gobierno y las compañías han venido elaborando un marco político de discusión aceptable por ambas partes. Las empresas han recorrido ya etapas importantes para su introducción en el mercado global; las tres tienen programados sus primeros lanzamientos comerciales para finales de este año.

El principal competidor para las compañías norteamericanas reside ahora en el consorcio europeo Arianspace. Colaboran en él gobiernos europeos e instituciones financieras e industriales, que comercializan la familia de cohetes Ariane desarrollados bajo los auspicios de la Agencia Espacial Europea. Antes



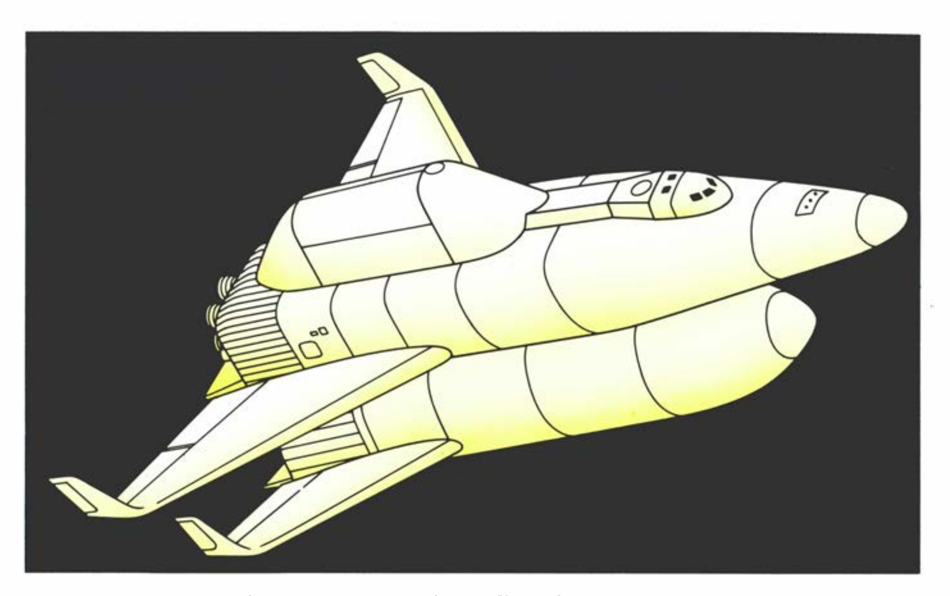
4. SERVICIOS DE LANZAMIENTO COMERCIALES, cuya competitividad crecerá desde comienzos de la próxima década. La mayoría de las organizaciones privadas o de los países que quieren poner cargas en el espacio dentro de los dos años próximos han establecido ya contratos con el consorcio europeo Arianespace. En enero de este año de 1989 había todavía 58 contratos de transporte de cargas al espacio todavía sin firmar. Un mercado de este estilo ofrece posibilidades para los constructores norteamericanos, aunque deberán competir no sólo con Arianespace, sino también con China y quizá con la Unión Soviética y Japón.

del accidente del *Challenger*, el transbordador y los Ariane se repartían a partes iguales el mercado de lanzamientos comerciales, pero Arianspace se llevó un buen número de nuevos contratos cuando los EE.UU. fracasaron en el desarrollo de un marco aceptable para su industria de lanzamientos. Tampoco Arianspace anduvo exenta de contratiempos; en mayo de 1987 sufrió un fallo en el despegue que obligó a retrasar los vuelos más de un año.

Las compañías que han de colocar en órbita sus satélites tienen un difícil mercado. Las tres empresas estadounidenses y Arianspace, juntas, están capacitadas para realizar de 30 a 40 lanzamientos cada año; sin embargo, la demanda previsible se mueve entre 15 y 25 lanzamientos. Tal situación conduce a una fuerte competencia. Se prevé que, en el futuro, el mercado resulte incluso más competitivo de lo que lo es en la actualidad. La Unión Soviética y la República Popular China pugnan por introducirse en el mercado, ofreciendo a los clientes potenciales sus cohetes Protón y Larga Marcha. También Japón está preparando su vehículo de lanzamiento, el H-2; a mediados de los noventa se habrá convertido en otra opción con la que contar.

Los principales encargos comerciales a poner en órbita se refieren a satélites de comunicaciones que utilizan, en su gran mayoría, tecnología cuya exportación a la Unión Soviética está prohibida. Por ese motivo, cabe presumir que el Protón no represente ninguna competencia fuerte a las alternativas occidentales, salvo que la mejor relación americano-soviética suavice el veto de transferencia tecnológica. Cambio de actitud que podría aplicarse también a China.

La suavización, en el caso de China, de las limitaciones impuestas a la exportación de tecnología ha provocado menos quejas de las compañías occidentales que los artificialmente bajos precios de promoción de los sistemas de lanzamiento chinos. Preocupado tanto por la seguridad nacional como por un juego comercial limpio, el gobierno de los EE.UU. ha llegado a un acuerdo con la administración china, en virtud del cual se permite que varios satélites de la compañía Hughes Aircraft Company se lancen con cohetes chinos, a condición de que éstos alteren su política de precios después de unos primeros lanzamientos y adopten medidas que impidan que, durante la preparación, se obtenga información técnica de la carga occidental.



5. SISTEMA AVANZADO DE LANZAMIENTO TRIPULADO que estudia la NASA. Pretende transportar pasajeros hacia el espacio, en viajes de ida y vuelta. El vehículo sería completamente reutilizable y constaría de un módulo orbital pilotado y un propulsor automático que aterrizaría en cualquier aeropuerto del país.

Aunque parece haber mercado suficiente para la coexistencia de varias empresas en ese sector, visto a largo plazo el panorama resulta preocupante. Los satélites de comunicaciones en órbita operan por debajo de sus posibilidades, y los sistemas de transmisión de información por fibra óptica se están convirtiendo en serios competidores de los satélites merced a su gran capacidad. La demanda de lanzamientos de satélites en órbita geoestacionaria crecerá sólo si se les asigna nuevas funciones: comunicaciones móviles, transmisión de televisión y posicionamiento en la navegación, por ejemplo.

En suma, los contratos gubernamentales mantendrán abiertas las líneas de producción de los cohetes propulsores en un futuro previsible, pero no parece que, a largo plazo, haya mercado suficiente para dar trabajo indefinidamente a todas las compañías que hoy compiten en el mundo. Por esa razón, para ser más competitivos mañana, se ha sugerido que las empresas estadounidenses consoliden su actividad espacial y converjan en un consorcio parecido al Arianespace. Como quiera que el éxito en el mercado internacional constituya un índice importante de una gestión acertada y contribuya a la mejora de la balanza comercial, el gobierno se ha fijado, entre sus objetivos políticos, la comercialización de los viajes.

Los proyectos para el cambio de milenio, en lo concerniente a los viajes espaciales no tripulados, pueden resumirse en tres objetivos técnicos: abaratamiento de los costes, mejora de la capacidad operativa y consecución de una potencia de acarreo de carga superior a la que ofrece la lanzadera. Metas que han ido perfilándose con especial claridad en el programa espacial desde que se pusieron de manifiesto los elevados costes de la lanzadera y sus limitaciones. Hay también otra razón importante: cualquier iniciativa de mayor ambición —despliegue de un sistema de defensa estratégico, establecimiento de una base lunar o envío de una misión tripulada a Marte—, requerirá un sistema de lanzamiento más capaz, más ágil y más fiable.

En 1985 el Departamento de Defensa y la NASA abordaron un estudio conjunto que pretendía examinar las prestaciones que el sistema de lanzamiento debería ofrecer a las demandas futuras, civiles y militares. Las conclusiones del mismo pusieron de manifiesto un grave aprieto en el que se había caído con la política seguida hasta ahora: la infraestructura técnica de los viajes espaciales, demasiado débil, no permite esbozar una recomendación inteligente sobre la tecnología de los sistemas de lanzamiento a emplear en el futuro. De ahí que en los dos últimos años, la NASA y Defensa hayan elevado sustancialmente sus inversiones en la investigación y el desarrollo de áreas como la propulsión de combustibles sólidos o líquidos, automatización, robótica y materiales ligeros. Pero se precisan importantes aportaciones de recursos para construir una infraestructura tecnológica adecuada que permita elegir entre los futuros sistemas de transporte espacial.

El principal marco gubernamental donde inscribir esas inversiones es el programa ALS (Advanced Launch System, Sistema Avanzado de Lanzamiento), impulsado por Defensa y codirigido hoy por la NASA y la Fuerzas Aéreas.

El hecho de que un oficial de las Fuerzas Aéreas esté al frente del programa refleja una nueva realidad: los futuros sistemas de lanzamiento no tripulados se desarrollarán bajo la supervisión del Departamento de Defensa para subvenir a sus necesidades específicas.

El programa ALS tiene un mandato legislativo para crear la capacidad de transportar carga a un coste inferior al de 120 dólares por kilogramo en órbita baja (los costes actuales van de 1200 a 2000 dólares por kilogramo) y conseguir que los vehículos espaciales gocen de flexibilidad suficiente en cuanto a capacidad de carga, sean fiables y, sufrido un fallo, pueda reemprenderse la actividad con rapidez. Tal como está constituido en la actualidad, el programa ALS se centra en el desarrollo de un soporte técnico muy versátil de transporte espacial y en el de una nueva familia de sistemas de lanzamiento que incorporen dicha tecnología; se prefiere ello a la construcción específica de un nuevo modelo de vehículo.

Se subraya el interés de considerar el programa como un sistema de transporte completo, pues resulta improbable que se consigan reducciones drásticas en los costes sin que haya cambios sustanciales en la forma en que se producen las operaciones de transporte, en la Tierra y en el espacio. Los costes de operación podrían alcanzar hasta el 45 por ciento del total del coste de un viaje del transbordador. El programa OTA acaba de publicar que ese gasto podría sufrir una reducción notable mediante la mejora técnica de las instalaciones espaciales terrestres y facilitando el flujo de la documentación y de los procesos de revisión que se producen durante la preparación de los viajes.

Para comienzos del siglo XXI, además de EE.UU. y la Unión Soviética, otros países (Europa, Japón y quizás China) esperan poder enviar naves tripuladas hacia el espacio; sin embargo, tan sólo los norteamericanos se habrán aferrado a un mismo vehículo, la lanzadera espacial, cuya tecnología se remonta a finales de los años sesenta. La NASA comienza a estudiar la posibilidad de introducir mejoras en el diseño básico de la lanzadera que podrían incorporarse en la flota de transbordadores existentes y en las naves que sustituyan a las actuales. (Los vehículos aludidos no forman todavía parte de los proyectos oficiales de ese ente norteamericano, pero se supone que lo harán pronto.) Ahora bien, las mejoras posibles a introducir tienen un límite. Por consiguiente, si los EE.UU. quieren mantener su liderazgo, al menos en los aspectos más llamativos de la actividad espacial, para llevar el hombre al espacio, el siglo que viene, deberán sustituir el transbordador por un nuevo vehículo.

Con este fin, la NASA ha puesto especial hincapié en el desarrollo del "Sistema de Lanzamiento Tripulado Avanzado" (AMLS). De acuerdo con el proyecto, el sistema tendría una capacidad limitada de transporte de carga (unos 9000 kilogramos) y no podría estar en órbita mucho tiempo (de dos a cinco días). Sería un vehículo de pasajeros, preparado para transportar seis o más personas hacia una estación orbital o volver de ella, así como hacia una órbita baja para reparación de satélites. No debería soportar cargas superiores. La NASA considera razonable que, para el año 2005, podría desarrollarse un sistema reutilizable que incluyera, amén de un modelo lanzadera, un propulsor dotado de capacidad aerodinámica, con poder para regresar a la Tierra y aterrizar en una pista cualquiera.

Hay en estudio otras vías alternativas para los viajes tripulados. Así, se ha propuesto el Avión Aeroespacial Nacional (NAP); utilizaría éste motores de hidrógeno, que funcionan tanto en la atmósfera como en el vacío del espacio, para despegar de una pista y entrar directamente en órbita. De este sistema y del ALS se están ocupando, conjuntamente, Defensa y la NASA. El Departamento de Defensa, primer responsable del proyecto, aporta más del 80 por ciento del presupuesto del programa, calificado como de alto secreto, y establece las prioridades acerca de sus características.

El presidente Reagan, en su discurso de 1986 sobre el estado de la nación, habló por primera vez del "Orient Express", proyecto de un vehículo que despegaría de cualquier aeropuerto y entraría directamente en órbita, viajando a una velocidad 25 veces superior a la del sonido, o volaría a velocidades hipersónicas de 5600 kilómetros por hora de EE.UU. a Japón. No se ha vuelto a comentar dicho proyecto. El avión X-30, prototipo con el que se someten a prueba distintos motores y materiales diversos que podrían convertir el proyecto en viable, está programado para volar de aquí a seis años. Sabemos muy poco de las previsiones para incorporar esos avances técnicos en vehículos espaciales tripulados de uso civil y militar.

Si alguno de estos tres proyectos (ALS, AMLS o NAP) se ve coronado con éxito, Estados Unidos dispondrá de nuevos vehículos a comienzos del nuevo siglo. Sin embargo, cualquier decisión sobre qué sistemas han de formar la próxima generación de propulsores habrá que tomarla teniendo en cuenta los objetivos exclusivos del país. Si se pretende seguir con los programas en ciencias y exploración espaciales, si se desea potenciar el rendimiento de los sistemas de seguridad nacional y se quiere hacer asequible el acceso al espacio de los que quieren investigar sus posibilidades comerciales, los futuros sistemas de transporte espacial deberán operar de forma rutinaria y a bajo coste. Esa fue la recompensa que se prometió con la lanzadera en 1972 y que, quizá 30 años más tarde, en los albores del nuevo siglo, pueda verse realizada.

De los lanzamientos fallidos los EE.UU. han sacado la lección de que no puede haber un programa espacial sin un acceso al espacio. Por otra parte, no debe confundirse el desarrollo de un sistema de transporte con un programa nacional de investigación espacial, que persigue objetivos concretos y determinados, mientras que áquel es un medio para conseguir dichos fines. Esperemos que los EE.UU., en los años venideros, no sucumban de nuevo ante su propensión de sustituir, con una decisión acerca de los medios, una decisión acerca de los objetivos hacia los que debe orientar su actividad en el espacio.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

SETTING SPACE TRANSPORTATION POLICY FOR THE 1990'S. Congressional Budget Office. U. S. Government Printing Office, octubre de 1986.

THE PRIVATE SOLUTION TO THE SPACE TRANSPORTATION CRISIS. James Bennet y Philip Sadin en *Space Policy*, vol. 3, n.º 3, págs. 181-205; agosto de 1987.

LAUNCH OPTIONS FOR THE FUTURE: A BUYER'S GUIDE. Office of Technology Assessment. U. S. Government Printing Office, julio de 1988.

REDUCING LAUNCH OPERATIONS COSTS: NEW TECHNOLOGIES AND PRACTICES. Office of Technology Assessment. U. S. Government Printing Office, septiembre de 1988.

THE SPACE SHUTTLE: THE JOURNEY CONTINUES. Richard Truly. NP-117, National Aeronautics and Space Administration, septiembre de 1988.

U. S. SPACE TRANSPORTATION POLICY: HISTORY AND ISSUES FOR A NEW ADMINISTRATION. Scott Pace en *Space Policy*, vol. 4, n.º 4, págs. 307-318; noviembre de 1988.

Resistencia oncológica a múltiples drogas

Una bomba proteica que expulsa las toxinas fuera de las células podría ser la culpable del fracaso de la quimioterapia. Su identificación aviva la esperanza de dominar los tumores que se han vuelto resistentes a múltiples drogas

Norbert Kartner y Victor Ling

La señora García se había quejado a su médico de dolor abdominal con calambres. Tras un minucioso examen, fue enviada a una clínica oncológica especializada; allí se le diagnosticó un tumor abdominal e inmediatamente se acometieron las diligencias para someterla a una operación quirúrgica. La eliminación del tumor primario se realizó con éxito, pero como sucede con frecuencia, el cáncer ya se había extendido a otros tejidos. La paciente fue sometida a un tratamiento de quimioterapia con una combinación de drogas anticancerosas; éste es el método utilizado en el caso de tumores sin circunscribir, que no se pueden tratar ni por cirugía ni con radiaciones; la respuesta fue milagrosa. Según todos los métodos de diagnóstico disponibles, estaba curada. Tres meses más tarde, durante un reconocimiento rutinario de seguimiento, se encontró que la señora García había tenido una recidiva: habían surgido tumores en varios órganos. Se la sometió a una segunda tanda de quimioterapia, pero respondió muy pobremente. Un mes más tarde, una tercera tanda de quimioterapia con diferentes drogas no consiguió nada: los tumores seguían creciendo. Tres semanas después, la señora García falleció.

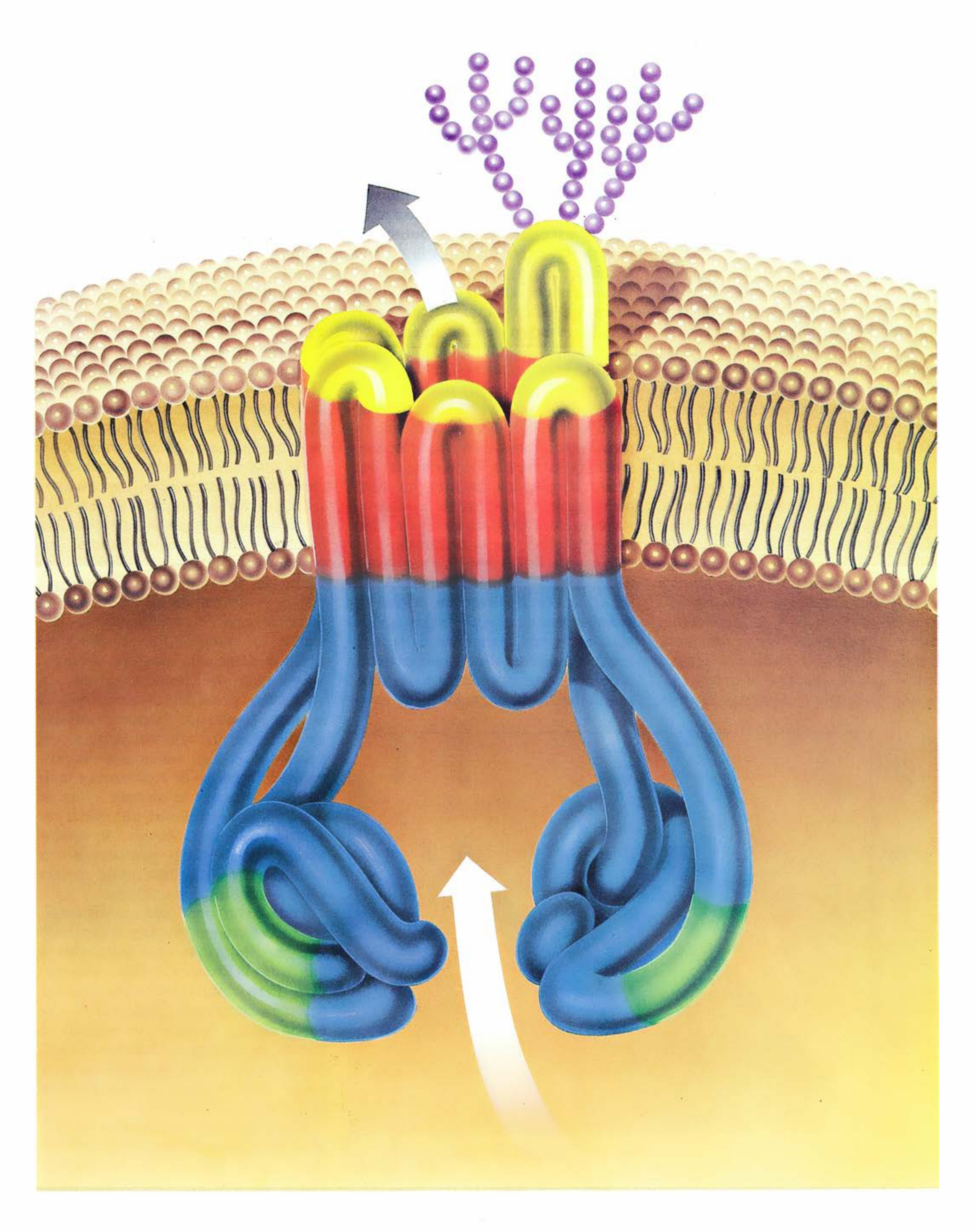
NORBERT KARTNER y VICTOR LING trabajaron juntos sobre la P-glicoproteína y sobre la resistencia a múltiples drogas en la Universidad de Toronto. Kartner se recibió de doctor en el departamento de biofísica médica de esa Universidad. Ling, profesor del departamento, pertenece al consejo científico del Instituto del Cáncer de Ontario. Tras doctorarse en 1969 por la Universidad de Columbia Británica, investigó en Cambridge con Frederick Sanger. Por su labor en el campo desarrollado en el artículo ha merecido diversos galardones internacionales.

¿Por qué fracasó en esa paciente la quimioterapia llegado cierto momento, si al principio pareció tener un gran éxito? ¿Por qué hay cánceres que son curables sólo con quimioterapia? ¿Por qué otros, aparentemente incurables, salen indemnes ante las drogas? Las cuestiones no son de hoy. En efecto, la resistencia, ante los antibióticos, de parásitos y organismos causantes de enfermedades infecciosas es tan antigua como la propia quimioterapia. El químico alemán Paul Ehrlich, padre de la quimioterapia, había imaginado "balas mágicas", es decir, drogas que curarían muchas de las enfermedades que azotan a la humanidad; después de varias décadas de experiencia con drogas antimicrobianas, se lamentaba, sin embargo, de que la resistencia a las drogas hubiese seguido al desarrollo de nuevas drogas, como la sombra a la figura.

La quimioterapia del cáncer tiene sus raíces en la quimioterapia antimicrobiana que se ha venido desarrollando desde comienzos de siglo. Por cuya razón, la resistencia clínica a las drogas anticancerosas no ha resultado algo totalmente inesperado. Una década antes de que la quimioterapia del cáncer entrase en medicina clínica, poco después de la segunda guerra mundial, ciertos experimentos realizados con tumores trasplantados a ratones habían demostrado ya el desarrollo de una progresiva resistencia a drogas de ensayo. Desde entonces, se han aislado ya los tumores resistentes a las distintas clases de drogas anticancerosas. Todos los organismos, incluidas las células que están en el cáncer de un paciente, parecen contar con la capacidad de adquirir resistencia a las drogas que, si tal no hubiera, las matarían.

La causa que subyace a esta progresiva resistencia a las drogas, en enfermedades infecciosas igual que en tumores, es la misma. En todas las células se producen mutaciones genéticas espontáneas que inducen rasgos heredables que pasan a la generación siguiente. En cualquier población de células, los mutantes que son resistentes a una determinada droga existen con una frecuencia aproximada que oscila entre una por cada 10^5 células y una por cada 10^8 células. ¿Cómo puede un acontecimiento tan raro condicionar el resultado de la quimioterapia? Para responder a esta pregunta es preciso, en primer lugar, tener en cuenta la escala microscópica de la célula y las limitaciones de los métodos para la detección precoz del cáncer.

Un tumor de un tamaño medio detectable, de un centímetro de diámetro, contiene ya cientos de millones de células, algunas de las cuales es probable que sean resistentes a las drogas. Por ello, a pesar de la poca frecuencia de aparición de mutaciones que producen resistencia a las drogas, la norma parece ser que, en el momento de ser diagnosticados, los tumores encierran ya células resistentes a las drogas. Tratar un tumor así con una sola droga lleva a un resultado previsto. En una primera fase asistiremos a una remisión, en la que el tumor merma hasta un tamaño indetectable, debido a la eliminación de las células sensibles a la droga, que eran las predominantes. Ahora bien, las células restantes, resistentes a la droga, y cuya descendencia es también resistente a las drogas, continúan multiplicándose. Con el tiempo, dominan en la población celular del tumor, que crece hasta provocar la muerte del paciente. Se ha confirmado que



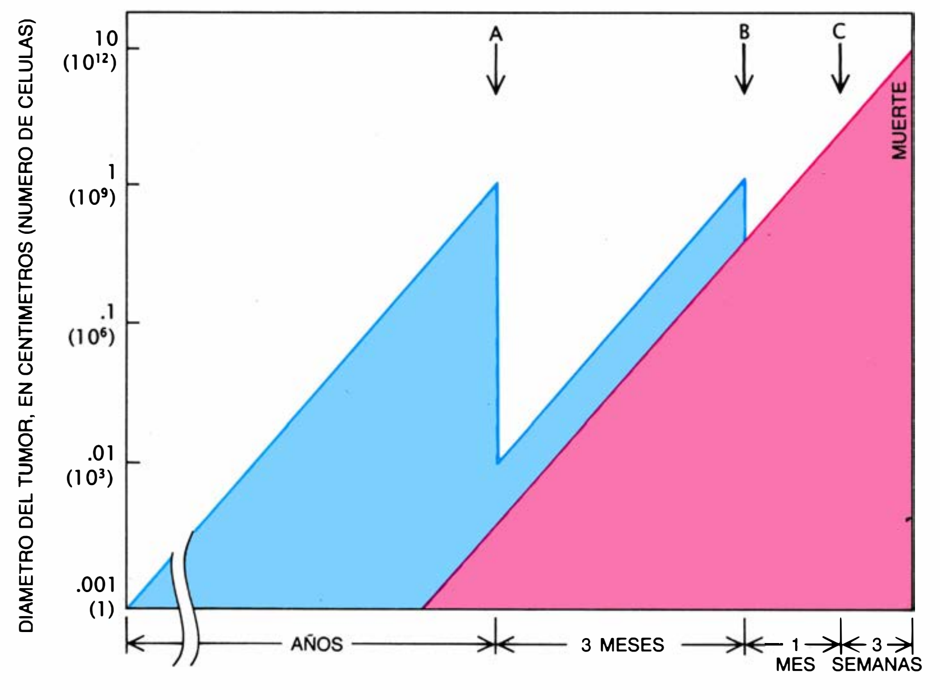
1. SE UBICA LA P-GLICOPROTEINA en la membrana celular; allí podría actuar bombeando toxinas hacia el exterior. Se ilustra aquí un modelo de la estructura de la proteína, basado en su conocida secuencia de aminoácidos. Se cree que la cadena proteica sale y entra unas doce veces, atravesando la bicapa lipídica de la membrana y formando un poro de doce lados. La parte de la proteína que queda fuera de la célula lleva sobre sí cadenas de azúcar (*arborescencia superior, en color morado*); dos grandes dominios, casi idénticos, se proyectan hacia el interior celular. Estos dominios incluyen extensiones (*color verde*) donde se fija el compuesto celular transportador de energía, el trifosfato de adenosina; a éste se le encarga aportar la energía impulsora del flujo hacia fuera (*flechas*).

basta una sola célula resistente a las drogas, introducida en un tumor que sea curable y trasplantado luego a un ratón, para que se siga multiplicando durante el curso del tratamiento quimioterapéutico y domine en la población celular del tumor, dando como resultado una enfermedad incurable y en último término fatal.

La solución del problema podría parecer muy sencilla. En teoría, el tratamiento, al inicio del tumor, con una combinación de fármacos que actuasen de manera diferente debería evitar el desarrollo de un tumor resistente a las drogas: la probabilidad de que surjan espontáneamente resistencias a dos o más drogas en una misma célula es muy pequeña. Una quimioterapia con combinación de drogas parecería ser la respuesta.

El reconocimiento de la necesidad de contar con una batería de drogas y de la inanidad de la bala mágica única, para el tratamiento de la enfermedad infecciosa avanzada, constituyó uno de los hitos fundamentales en el curso seguido por la investigación farmacéutica de la primera mitad de siglo. La mayoría de los principios de la quimioterapia antimicrobiana fueron adoptados literalmente por los oncólogos, quienes pedían que se estudiase la producción de nuevas drogas y desarrollaran protocolos para administarlas de forma combinada. Nuevas drogas y quimioterapia de combinación lograron auténticas victorias hace un par de décadas: anotaron en su haber cifras altas de curación en algunas leucemias infantiles y en la enfermedad de Hodgkin. Pero los grandes asesinos –el cáncer de pulmón, el cáncer de mama y los cánceres del tracto gastrointestinal– continuaron mostrándose refractarios a la quimioterapia.

Los desconcertantes fracasos, especialmente los de la quimioterapia combinada, parecían desafiar nuestros conocimientos. Se multiplicaron las hipótesis para explicar los datos de observación, pero muy pocas recibían respaldo sólido. Desde el inicio del desarrollo de la quimioterapia experimental en ratones, se vio que la resistencia simultánea a varias drogas constituía, sorprendentemente, un fenómeno habitual. A pesar de lo cual, las investigaciones se centraron en el caso, más inteligible, de la resistencia a un solo agente. Hasta finales de la década de los sesenta, cuando empezaron los experimentos *in vitro* con células tumorales resistentes a las drogas, no volvió a reavivarse la cuestión de la resistencia a múltiples drogas. De entonces proceden las primeras intuiciones sobre lo que había de definirse luego como fenotipo de resistencia a múltiples drogas.



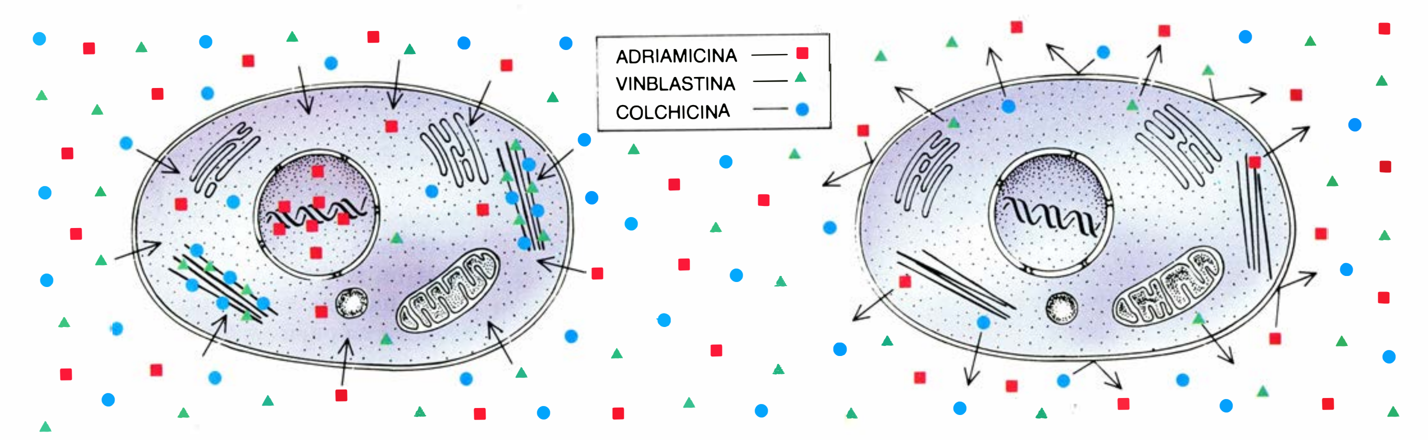
2. FRACASO DE LA QUIMIOTERAPIA tras el éxito inicial. En este modelo del progreso de un cáncer, el primer ciclo de quimioterapia (*A*) parece tener éxito: reduce el tumor hasta un tamaño indetectable al matar la mayoría de las células sensibles a la droga (*azul*). Sin embargo, no tiene ningún efecto sobre la corta población de células mutantes resistentes a la droga (*rojo*), que crece de forma exponencial mientras se va recuperando la población sensible a la droga. La detección de la recurrencia hace que se aplique una segunda tanda de quimioterapia (*B*). Esta tanda reduce de nuevo la población sensible a la droga, pero no tiene ningún efecto sobre la fracción –ahora ya cuantificable– de células resistentes a la droga. Una tanda final de quimioterapia (*C*) no ejerce ya ningún efecto y el crecimiento descontrolado del tumor acaba matando al paciente.

A través de la observación se fueron acotando las propiedades fundamentales de la resistencia a múltiples drogas. Se seleccionaron mutantes resistentes, utilizando los fármacos antitumorales uno a uno; mas, con frecuencia, resultaban simultáneamente resistentes, es decir, presentaban resistencia cruzada a drogas que no guardaban ninguna relación mutua, y lo que era más importante: de acuerdo con una gavilla de experimentos genéticos autónomos, la resistencia a múltiples drogas nacía de una sola mutación. Dicho de otro modo, un solo gen podría ser el responsable de la resistencia múltiple y cruzada ante drogas que no muestren ninguna relación entre sí.

De este nuevo cuadro teórico derivaron tres consecuencias importantes. Estimuló las investigaciones encaminadas a aislar el gen de la resistencia múltiple a las drogas en tumores experimentales, promovió el estudio del efecto del gen y proporcionó una explicación racional de los fracasos de la quimioterapia de combinación de fármacos. La mutación que produzca resistencia a una sola droga es, de suyo, un episodio raro; por consiguiente, la adquisición de múltiples mutaciones en la misma célula, que confieran resistencia a drogas sin relación entre sí, se convierte en algo sumamente improbable. El fenotipo de resistencia a múltiples drogas, que se obtenía a raíz de una mutación, explicaba por qué la resistencia a la quimioterapia de combinación podía ser algo que ocurría con frecuencia. Pero, ¿cómo podía un solo gen ejercer efecto tan extenso?

Trabajando con diversos sistemas, los investigadores habían encontrado que las células que eran resistentes a una droga la excluían de una u otra manera. Eran observaciones que sugerían cierto mecanismo de resistencia: la presencia de una barrera que impedía la llegada de la droga al interior celular, donde tendría que producir su letal efecto. Para explicar ese fenómeno se propusieron dos hipótesis.

Para la primera, una barrera de permeabilidad impedía la entrada del fármaco en el interior de las células. Según la segunda, en las células resistentes había una suerte de bomba expelente, un mecanismo que bombeaba activamente la droga hacia el exterior de la célula, tras haber conseguido penetrar en la misma. Esta segunda hipótesis se basaba en el seguimiento de



3. EN VIRTUD DE LA RESISTENCIA A MULTIPLES DROGAS, la célula sale al paso de moléculas tóxicas, que varían en cuanto a su tamaño, estructura y sitio de acción. La adriamicina, una droga anticancerosa común, actúa en el núcleo de la célula sensible al fármaco (*esquema ideal de la izquierda*) bloqueando la transcripción del ADN y su síntesis durante la división celular. Otros dos compuestos tóxicos usados en quimioterapia y en estudios con células resistentes a las drogas, la vinblastina y la colchicina, afectan a los microtúbulos, estructuras de sostén que intervienen en la división celular. Una barrera pasiva, lo mismo que una bomba activa en la membrana celular, podrían explicar la resistencia simultánea a unos agentes tan diversos (*esquema ideal de la derecha*).

la cinética del flujo del fármaco hacia el interior celular y hacia su exterior. Descubrióse que, al envenenar transitoriamente una célula resistente con cianuro para inhibir la producción de energía, la célula se comportaba como si fuese sensible a la droga: no podía expulsar la droga. Cuando se retiraba el cianuro y se restablecía el metabolismo normal, la célula tornaba de nuevo a desechar la droga. Además, la célula se mostraba entonces capaz de bombear hacia fuera toda la droga que se había acumulado en su interior mientras duraba su estado de intoxicación. Así, pues, la presencia de una bomba expelente y que dependía de la potencia energética parecía ser la explicación más simple.

Sea cual fuere el mecanismo real, había dos puntos bastante claros. Primero: el proceso para mantener las drogas fuera de la célula debía ser inespecífico, es decir, capaz de hacer frente a drogas con estructuras moleculares diversas. Segundo: puesto que la membrana superficial de la célula (la membrana plasmática) es la primera línea de defensa contra la entrada de drogas, la diferencia entre células sensibles y células resistentes a los fármacos residiría probablemente allí.

Quizá la primera prueba directa de una alteración específica de la membrana plasmática en la resistencia a múltiples drogas provenga de nuestros estudios con células de hámster chino, resistentes a la colchicina. Realizamos los ensayos en colaboración con Rudolph L. Juliano y posteriormente con John R. Riordan, ambos del Hospital Infantil de Toronto. Separábamos los componentes de las membranas plasmáticas de las células de hámster chino por electroforesis en gel, técnica en virtud de la cual las moléculas avanzan a través de un gel movidas por un campo eléctrico; se separan, pues, de acuerdo con sus tamaños.

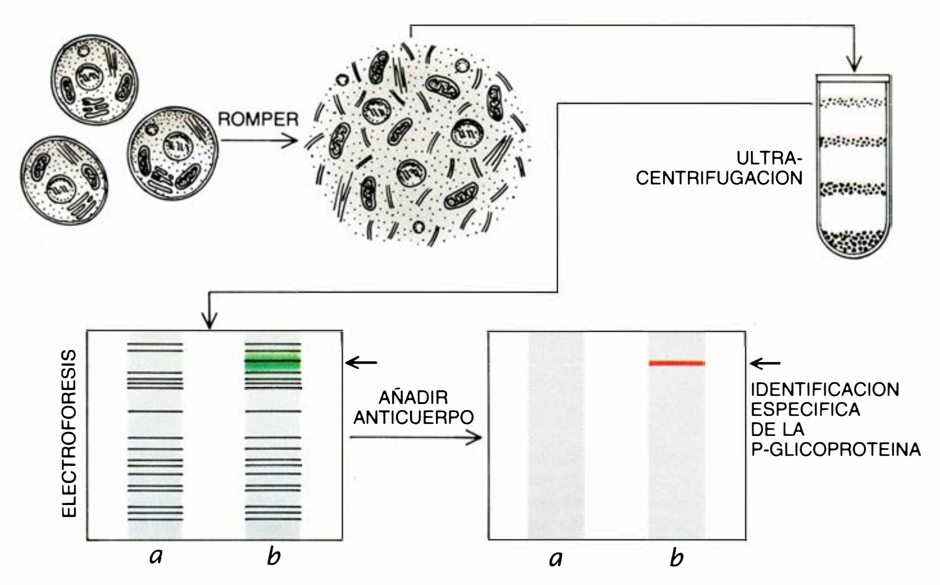
El proceso puso de manifiesto que, en las células resistentes a la droga, había cierta glicoproteína de la que carecían, al parecer, las células sensibles. Las glicoproteínas son moléculas complejas que constan de proteína y carbohidratos; suelen hallarse asociadas a la membrana plasmática. Esta glicoproteína, de un tamaño considerable (su peso molecular se cifraba en torno a 170.000), se hallaba, en efecto, asociada específicamente a la membrana plasmática. Le impusimos el nombre de P-glicoproteína, en virtud de su relación con la barrera de permeabilidad a las drogas que acompañaba a la resistencia a múltiples fármacos.

No mucho tiempo después del primer informe sobre el comportamiento de la P-glicoproteína de células de hámster chino, otros grupos de investigadores publicaron hallazos semejantes. Cada grupo trabajaba con un sistema diferente de cultivo de tejidos. Se seleccionaron varias células de ratón, de hámster y humanas por su resistencia a una u otra de las drogas siguientes: adriamicina, colchicina, daunomicina, vinblastina, vincristina, etcétera. Todos estos sistemas mostraban amplia resistencia cruzada a drogas sin ninguna relación, reducida acumulación intracelular de los fármacos implicados y alteraciones en la membrana de la superficie de la célula. La más pertinaz de las alteraciones observadas era la presencia de una glicoproteína de superficie celular de elevado peso molecular y de un tamaño similar al de la P-glicoproteína. Estos hallazgos nos llevaron a plantearnos la cuestión de si esos fenómenos tan dispares guardaban alguna suerte de relación.

Para responder a esta cuestión se requerían instrumentos más precisos. Así, decidimos abordarla desde el punto de vista inmunoquímico. Lo que implicaba fabricar anticuerpos con marcadores que se adhirieran a una molécula específica, en nuestro caso la P-glicoproteína, para poder aislarla y estudiarla. Para desarrollar anticuerpos altamente específicos, anticuerpos monoclonales, comenzamos por inyectar en ratones membranas plasmáticas purificadas procedentes de células resistentes a múltiples drogas. Luego, fusionando células del bazo de estos ratones inmunizados con células tumorales inmortales, produjimos clones de células híbridas secretoras de un mismo anticuerpo. Aislamos los clones que segregaban anticuerpos monoclonales contra la P-glicoproteína.

Tratamos luego de determinar si una cantidad mayor de P-glicoproteína estaba relacionada con un alto grado de resistencia cruzada. Con ese objetivo, empleamos la técnica de inmunotransferencia (“immunoblotting” o parcheo inmunitario) en la que los anticuerpos servían para identificar la P-glicoproteína en una mezcla compleja de proteínas y glicoproteínas, separadas mediante el proceso de electroforesis en gel. Según lo esperado, esos borrones inmunitarios mostraban que había muy poca P-glicoproteína en las células de hámster chino sensibles a la droga y que se iba encontrando cantidades crecientes de P-glicoproteína en líneas celulares que resultaban ser cada vez más resistentes a la colchicina.

Habíamos previsto el resultado. Pero, cuando aplicamos el mismo mé-



4. COMPOSICION DE LA SUPERFICIE CELULAR; en razón de la misma se distinguen las células sensibles a la droga de las células resistentes. Las proteínas de la superficie se extraen triturando las células y resuspendiendo sus componentes en una solución de sacarosa, cuya densidad aumenta de arriba abajo. Cuando se centrifuga la solución, los componentes de la membrana celular, que tienen una densidad baja, forman una banda próxima a la parte superior del tubo. Por electroforesis en gel se separan, de acuerdo con su tamaño, las proteínas de la membrana. Las células resistentes a múltiples drogas (*b*) presentan una proteína (*banda verde*) que no aparece en las células sensibles a las drogas (*a*). El desarrollo de un anticuerpo específico que marca la proteína –la P-glicoproteína– fue un paso crucial en el trabajo realizado por el autor.

todo a distintas líneas celulares que nos habían suministrado otros grupos de investigadores, observamos con asombro que las líneas celulares de ratón, de hámster chino, de hámster sirio y humanas, seleccionadas por su resistencia a diferentes drogas, compartían todas, entre sus componentes de las membranas plasmáticas, la P-glicoproteína. Estos componentes no sólo eran indistinguibles por su tamaño, sino que también resultaban altamente específicos para la P-glicoproteína de las células de hámster chino.

Quedaba claro que la P-glicoproteína era una molécula retenida en el curso de la evolución: una molécula que había mantenido su identidad estructural a través de diferentes especies de mamíferos. Además, con independencia de cuál fuese la especie de origen o la droga de selección, todas las células resistentes al fármaco mostraban una expresión reforzada de la P-glicoproteína, que estaba además de acuerdo con el desarrollo de resistencia a la droga. La conservación de la estructura de las moléculas biológicas denuncia, por lo común, un importante papel funcional. Esta premisa, sumada a la idea de universalidad de la expresión de la P-glicoproteína en concierto con la resistencia a múltiples drogas, resultaron de importancia capital para decidir la dirección que habíamos de tomar luego.

Era manifiesto que la P-glicoproteína intervenía de forma destacada en la resistencia a múltiples drogas. Por ello recurrimos a instrumentos de biología molecular que pudieran darnos una visión más cercana de la estructura y, en último término, de la función de la propia molécula. Para determinar la estructura de una proteína, nada mejor que encontrar la secuencia genética que la codifica; útil apropiado es el ADN complementario, abreviado en ADNc; éste se corresponde con el ADN que determina la proteína cuyas propiedades constituyen el objeto de estudio.

Preparamos el ADNc en colaboración con Riordan, quien había establecido una biblioteca de ADNc de células de hámster chino altamente resistentes a la colchicina. Una biblioteca de ADNc es un almacén vivo de material genético. La misma se abastecía de bacterias, infectada cada una por un virus, un bacteriófago. Bacteriófagos que, a su vez, eran recombinantes; su material genético contenía insertado, pues, un fragmento de ADN foráneo. El ADN insertado era ADNc obtenido con ARN mensajero que las células resistentes a la droga traducían intensa y activamente en distintas proteínas. (El ARN mensajero, o ARNm, es el intermediario en la transferencia de información desde el ADN hasta las proteínas.) Los fragmentos de ADNc se insertaron en un gen vírico que determinaba la enzima beta-galactosidasa. Cuando el gen vírico se infiltraba en el material genético de la bacteria, ésta expresaba una beta-galactosidasa alterada que contenía un fragmento adicional de proteína, codificado por el ADNc.

Encontrar el ADNc que correspondía a la P-glicoproteína en placas que contenían decenas de miles de colonias bacterianas, cada una de las cuales producía un fragmento de proteína diferente, hubiera sido como buscar una aguja en un pajar. Ahora bien, con un anticuerpo monoclonal marcado radiactivamente, que actuaba como un "imán" específico para la P-glicoproteína, podíamos identificar rápidamente las células buscadas. Al cultivar la colonia seleccionada, en la que todas las bacterias habían derivado de una misma célula que transportaba un solo fragmento de ADNc, logramos aislar un fragmento clonado del ADNc de la P-glicoproteína. Este fragmento clonado podría servir luego de sonda para realizar una hibridación de transferencia ("blot hybridization"), uno de los métodos analíticos más poderosos de la biología molecular.

Este método de hibridación por parcheo, en el que una sonda de ADNc sirve para recoger secuencias correspondientes de ADN o ARN que han quedado separadas por electroforesis, nos ofrece una valiosa información sobre la naturaleza y función de la molécula de P-glicoproteína. Se realizaron dos tipos de parcheo por hibridación. En el primero ("parcheo septentrional"), el ADNc aislado sirvió para sondear el ARNm procedente de distintas líneas celulares. Descubrióse que cierta clase de ARNn, de unas 4,5 kilobases de longitud (un ARNm que contenía unas 4500 subunidades químicas, denominadas bases), estaba asociado a varias células resistentes a múltiples drogas, pero no lo estaba a las células equivalentes y sensibles a la droga; cuanto más resistentes eran las células, mayor era la cantidad del ARNm específico. De lo que cabía inferir que este ARN tenía que ver con la producción de la P-glicoproteína.

El otro método es, obviamente, el "parcheo meridional". Empleaba ADNc para sondear el ADN genómico, el ADN del núcleo de la célula. De acuerdo con los resultados de este trabajo, se comprobó que el incremento de P-glicoproteína hallado en las células resistentes a múltiples drogas debíase a un proceso redundante ("amplificación") de un gen: abundancia de copias de un mismo gen. Las células resistenes portaban hasta 60 copias del gen de la P-glicoproteína. Dato que

confirmaba que la resistencia a múltiples drogas era el resultado de dicho proceso de redundancia génica. En nuestro sistema, "sondas recuperadoras meridionales" ponían de manifiesto no la única o el par esperado para un solo gen, sino múltiples bandas, tanto en las células sensibles a la droga como en las células resistentes. De acuerdo con la explicación más sencilla, ello era así porque en la dotación genética normal de la célula había más de un gen de resistencia a múltiples drogas: genes distintos aunque estrechamente relacionados, formando una familia multigénica.

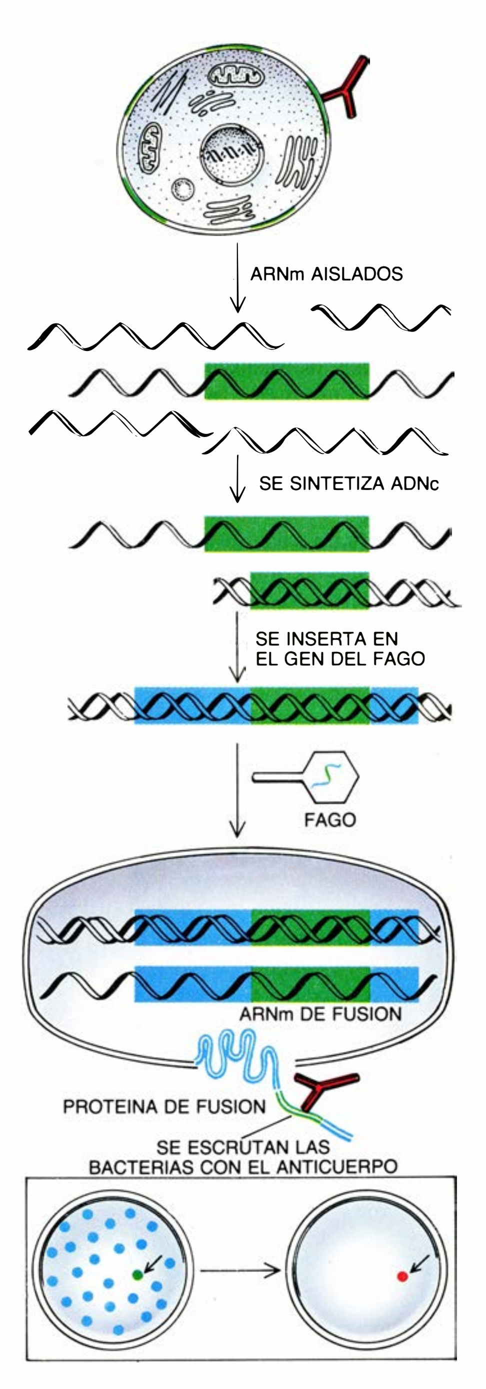
Mientras se avanzaba en este trabajo, otros grupos seguían investigando la resistencia a múltiples drogas. El problema era abordado, desde enfoques distintos, por Igor B. Roninson, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, y por Piet Borst, del Instituto Holandés del Cáncer. Clonaron fragmentos de ADN asociados a la resistencia a múltiples drogas; cada uno siguió su propio proceso. Pero, al margen de la discrepancia metodológica, su trabajo confirmó nuestros resultados: en todos los casos se apreciaba multiplicación génica y expresión reforzada del ARNm de 4,5 kilobases. El tamaño del ARNm ofrecía la clave de la proteína que codificaba; tenía la longitud esperada para un ARNm que determinase una proteína del tamaño de la P-glicoproteína.

Los anticuerpos monoclonales nos permitieron identificar, fuera de toda duda, nuestra sonda de ADNc con la P-glicoproteína. El producto parcial del gen, sintetizado por las bacterias, acoplaba tres anticuerpos monoclonales diferentes, que reconocían distintos sitios de la P-glicoproteína. Un intercambio de la información sobre la secuencia parcial del ADN dejó ver con claridad que los tres grupos, de forma independiente y por procedimientos y razonamientos muy distintos, habían clonado genes de la P-glicoproteína. Parecía asegurado el papel funcional, desempeñado por la P-glicoproteína, en el fenotipo de resistencia a múltiples drogas.

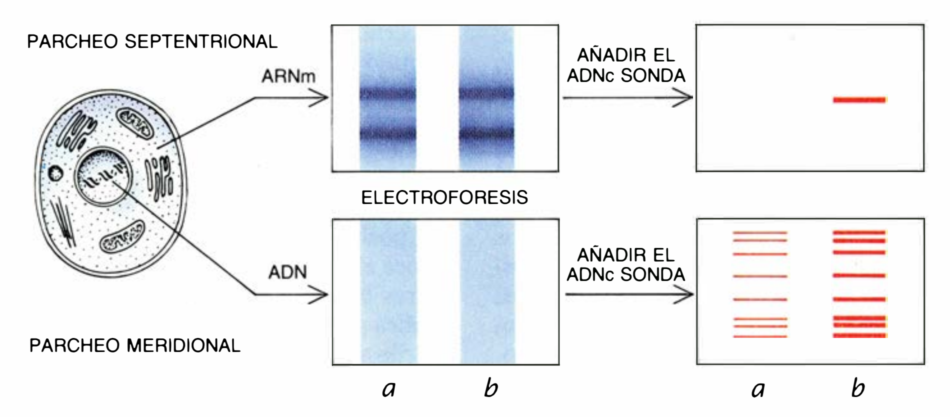
Desde un punto de vista de estricto rigor científico, este tipo de prueba circunstancial no bastaba; se necesitaba otra prueba directa y se buscó. Se consiguió en el laboratorio de Philippe Gros, de la Universidad McGill. Gros tomó un fragmento de ADNc que contenía, entera, la región codificante de la P-glicoproteína procedente de una célula de ratón sensible a la droga; lo insertó en una célula normal de hámster sensible a la droga, en un proceso de transferencia génica ("gene transfection"). Cuando la descendencia de la célula así alterada creció en presencia de una droga seleccionadora, Gros llegó a la conclusión de que esas células eran resistentes a la droga. Aisló ADN y ARNm de dichas células; rastreó su contenido mediante el proceso de hibridación ya mencionado. Encontró que las células de hámster contenían múltiples copias del gen para la P-glicoproteína del ratón y que expresaban el gen. No habiéndose dado ningún cambio más en la que originalmente era una célula sensible a la droga, parecía que los elevados niveles de expresión de P-glicoproteína explicaban por sí solos la resistencia al fármaco.

Se investigó la resistencia que las células de hámster oponían a drogas que no guardaban ninguna relación entre sí, gracias a lo cual se supo que presentaban la misma resistencia cruzada amplia, observada en las células resistentes a múltiples drogas que surgían espontáneamente. Puesto que sólo se había insertado un gen, un único miembro de la familia multigénica de la P-glicoproteína, resultaba evidente que bastaba un mismo tipo de molécula de P-glicoproteína para explicar la amplia resistencia cruzada a drogas dispares (sin ninguna relación), característica que define la resistencia a múltiples fármacos.

¿Cómo era posible que una sola especie molecular, la P-glicoproteína, acometiera una tarea de semejante complejidad? Los primeros pasos encaminados hacia una comprensión pormenorizada del funcionamiento de la P-glicoproteína se dieron al deducir su secuencia primaria de aminoácidos completa. La secuenciación del ADN, convertida ya en práctica rutinaria, permitió conocer enseguida la serie de bases de ADNc que representaba la longitud total del ARNm codificador de la P-glicoproteína. Una vez registrada la secuencia codificadora, podía traducirse en una secuencia de aminoácidos, posibilidad que se apoya en que se conoce el código genético y cada codón de tres bases de la secuencia de ADN codifica para un aminoácido específico. De ello resultó que la denominada secuencia primaria tenía una longitud correspondiente a unos 1280 aminoácidos. Contando ya con la secuencia primaria, podía buscarse la secuencia correspondiente a determinadas caracte-



5. CLONACION DEL ADN de la P-glicoproteína. Comienza con la identificación, mediante un anticuerpo monoclonal (*rojo*), de una célula que produce P-glicoproteína (*verde*) y con el aislamiento de ARN mensajeros (ARNm) que determinan las proteínas de la célula. Luego, se sintetiza ADN bicatenario complementario (ADNc) para una porción de cada uno de los ARNm. Cada ADNc se inserta en un gen (*azul*) del fago lambda, un virus que infecta las bacterias. La bacteria infectada transcribe el "gen de fusión" resultante en ARNm y traduce el ARNm en una proteína de fusión; ésta incluye parte de una proteína de la célula original. Cada bacteria que lleva un gen de fusión se multiplica y crea un clon de bacterias genéticamente idénticas que expresan el mismo gen de fusión. El anticuerpo identifica el clon que tiene la proteína de fusión que lleva incorporada una porción de la P-glicoproteína. El clon sirve de fuente de ADN correspondiente a la P-glicoproteína.



6. BASE GENETICA de la resistencia a múltiples drogas. Se investiga por el método de sondas utilizando ADNc, correspondiente a la P-glicoproteína, clonado. En la técnica del "parcheo septentrional" se extrae ARNm de las células, se separa por electroforesis y se transfiere a un papel de filtro. Cuando se aplica al filtro ADNc marcado radiactivamente, éste se une al filtro, y marca así al ARNm correspondiente, en este caso el ARNm determinante de la P-glicoproteína. El procedimiento muestra que, mientras las células sensibles a la droga (*a*) producen poco ARNm para la P-glicoproteína, las células resistentes a la droga (*b*) producen una cantidad que se corresponde con su nivel de resistencia. El origen de esta mayor cuantía de ARNm se pone de manifiesto mediante la prueba del "parcheo meridional" que utiliza como sonda ADN en lugar de ARN. El ADN se rompe en fragmenos que se separan por electroforesis, se transfieren a un filtro y se exponen al ADNc radiactivo. Tanto en el caso de células sensibles como de células resistentes, la sonda de ADNc identifica ocho fragmentos de ADN; ello sugiere que la P-glicoproteína está codificada por una familia de genes. Los fragmentos se tiñen con mucha más intensidad en las células resistentes (*b*), lo que da a entender que la resistencia se desarrolla cuando los genes aparecen copiados de manera redundante (amplificados).

rísticas estructurales que se sabía que poseían funciones específicas. La fiabilidad de los ordenadores y la existencia de un copioso banco de datos sobre secuencias de proteínas permiten realizar esta tarea con relativa facilidad.

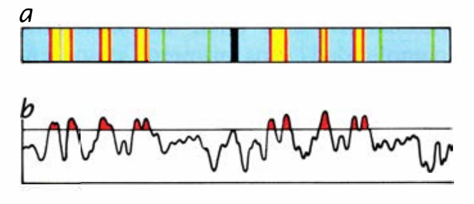
Algunas propiedades de la P-glicoproteína quedaron inmediatamente de manifiesto. Se encontraron secuencias cortas que constituían las regiones donde se añadían las moléculas de azúcar para producir una glicoproteína. Otra información crucial tenía que ver con la afinidad variable de los aminoácidos por los lípidos o por el agua. La gráfica de hidropatía es un constructo teórico que permite identificar regiones de una secuencia primaria de aminoácidos que se asociarán a la bicapa lipídica de la membrana plasmática. Cuando estas regiones presentan una longitud continua de unos 21 aminoácidos, se dice que son regiones transmembranales: pueden atravesar la membrana desde el interior hacia el exterior de la célula o en sentido inverso. En la secuencia de la P-glicoproteína se identificaron varias de estas regiones transmembranales.

Empezamos a entender el significado de estas propiedades estructurales al comparar sus secuencias con las de otras regiones del interior de la misma molécula proteica y con secuencias de otras proteínas conocidas. Mostrábase que las secuencias de la P-glicoproteína caracterizadas por los diferentes laboratorios eran muy similares, pero había más; poníanse de manifiesto ciertas propiedades de la estructura de la P-glicoproteína de singular curiosidad. La molécula de la P-glicoproteína se halla internamente duplicada; es decir, la primera mitad de la secuencia de la proteína es muy similar a la segunda mitad. Fenómeno que induce a pensar en un gen ancestral y sencillo que se duplicó para crear un tandem de repetición que originó la proteína más compleja que vemos hoy.

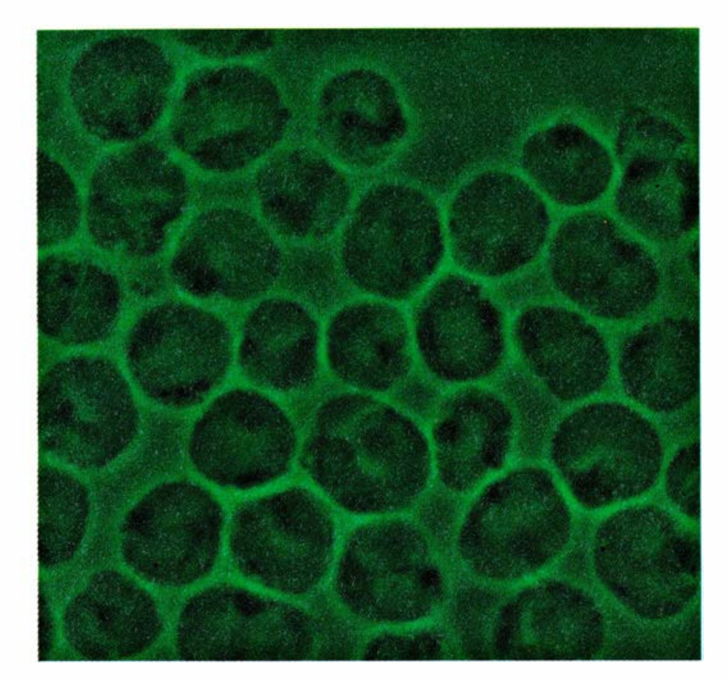
Cada hemisecuencia posee seis presumibles regiones transmembranales. ¿Qué indica ello? Que la molécula de P-glicoproteína puede deslizarse hacia adelante y hacia atrás, por la membrana, doce veces. Tal compleja configuración transmembranal es característica de proteínas formadoras de canales o de poros, proteínas implicadas en el transporte de nutrientes, de iones y de metabolitos celulares a través de la membrana superficial de la célula, ya sea hacia el interior, ya hacia el exterior celular.

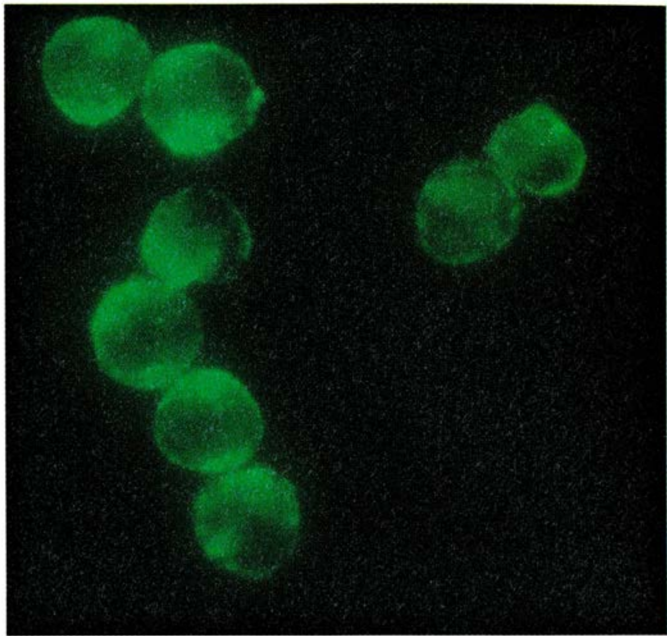
La comparación con un banco de datos sobre proteínas confirmó la sospecha de que la P-glicoproteína se parecía a una proteína de transporte de la membrana. Se descubrieron regiones similares a regiones de proteínas de transporte conocidas, presentes en organismos muy dispares, de las bacterias a los insectos. La región primaria, que mostraba un elevado grado de conservación entre especies tan divergentes, resultó ser una región de fijación del ATP. La molécula de ATP, o trifosfato de adenosina, proporciona energía para la actividad bioquímica. Ambas mitades de la P-glicoproteína contienen una región hidrófila extensa, región que es más verosímil que esté en contacto con un ambiente acuoso que con un entorno lipídico. Se vio que esta región caía hacia la cara interna de la membrana plasmática. Allí donde se ubicaba el sitio de unión del ATP.

Los bancos de datos de proteínas existentes aportaban una sorpresa importante: las mitades homólogas de la



7. ESTRUCTURA DE LA P-GLICOPROTEINA, inferida a partir de su secuencia de aminoácidos. Por ella se supo que la cadena de proteína (*a*) constaba de dos mitades similares. A cada uno de los aminoácidos se le asignó un valor de hidropatía, es decir, de afinidad por un entorno lipídico, como la membrana celular, en contraposición con un ambiente acuoso, como el interior o el exterior de la célula. Una gráfica de hidropatía (*b*) de la cadena sugería la existencia de 12 segmentos separados (*en rojo*) que están inmersos en la membrana celular. La información proporcionada por la secuencia puso además de manifiesto algunos segmentos (*verde*) que probablemente fijaban la molécula portadora de energía, ATP, y una región en donde es probable que se unan las cadenas de azúcar (*morado*). Con la información sobre los segmentos de la cadena pudo esbozarse el modelo de la estructura de la proteína (*izquierda*).





8. CELULAS LEUCEMICAS; unas son sensibles a las drogas y otras resistentes, pero resultan indistinguibles en una microfotografía (*izquierda*). Cuando exponemos esas mismas células a un anticuerpo fluorescente que se une específicamente a la P-glicoproteína, la microfotografía de fluorescencia con luz ultravioleta sólo permite ver las células resistentes a la droga: se han vuelto fluorescentes porque incluyen elevadas proporciones de P-glicoproteína (*derecha*). Este ensayo con anticuerpos puede servir para identificar las células resistentes a las drogas en biopsias de tumores. Cabe, incluso, que los anticuerpos sirvan de mensajeros para repartir toxinas capaces de destruir las células resistentes a las drogas. Las microfotografías fueron proporcionadas por Grace Bradley.

P-glicoproteína se parecían mucho a una proteína descrita con anterioridad, la hemolisina B. Se encuentra esta última en la membrana superficial de ciertas bacterias y es responsable del transporte, hacia el exterior celular, de la alfa-hemolisina, una proteína.

De estos estudios sobre la secuencia de aminoácidos y las comparaciones con otras proteínas salió un modelo sobre la estructura de la P-glicoproteína; con él se sugieren posibles vías por las que la proteína podría oponer resistencia a múltiples drogas. Es probable que las 12 regiones transmembranales de la P-glicoproteína converjan y formen un poro de doce lados. En la parte externa de la célula sólo asoma un breve resquicio expuesto de la proteína; se fijan en él las cadenas de azúcar que la convierten en glicoproteína. En el interior celular se alojan dos grandes dominios homólogos, que se proyectan hacia el citoplasma, donde se encuentran los sitios de unión con el ATP. Los sitios que aceptan ATP en la molécula de P-glicoproteína sugieren que la proteína posee una función transductora de energía, verbigracia, la expulsión de la célula de drogas tóxicas, fenómeno éste que depende de la aportación energética.

La P-glicoproteína bombea, tal parece, drogas hacia el exterior celular por una de estas dos vías: o bien fija cierto número de fármacos y los expulsa luego directamente a través de la membrana, siguiendo el camino marcado por su presunto poro transmembranal, o bien una segunda molécula (una proteína transportadora, "carrier") se une a la droga y entonces lo que se expulsa, a través de la membrana, es el complejo droga-proteína transportadora. La segunda posibilidad se basa en la semejanza entre P-glicoproteína y hemolisina B, que arroja la alfa-hemolisina a través de la membrana celular bacteriana. No se ha encontrado todavía ninguna prueba directa que corrobore la existencia de una proteína transportadora y subsidiaria de la P-glicoproteína. Se ha observado que algunas drogas pueden unirse directamente a la P-glicoproteína, como primer paso, quizá, de su ulterior transporte a través de la membrana superficial.

La posterior secuenciación de varios genes de la P-glicoproteína procedentes de especies diversas, y realizada por un número creciente de laboratorios que trabajan en este campo, ha permitido establecer comparaciones entre distintos genes de una misma especie o de especies diferentes. Tales comparaciones han vertido alguna luz sobre la evolución de la P-glicoproteína y sobre la organización de sus genes. La organización similar de las secuencias codificantes y de las secuencias intermediarias en los distintos genes determinantes de la P-glicoproteína y que proceden de la misma especie sugiere que la duplicación interna de un gen ancestral se produjo antes de que se formase una familia multigénica. Las semejanzas en la organización de miembros homólogos de la familia multigénica en diferentes especies de mamíferos sugiere que la formación de una familia multigénica precedió a la divergencia de las especies, al final de la evolución de los mamíferos.

Esa larga historia evolutiva de la P-glicoproteína y la conservación de su estructura obligan a plantearnos la función normal de la molécula y su modo de comportamiento. Para abordar esos puntos se han propuesto dos teorías. En virtud de la primera, la P-glicoproteína realizaría la misma tarea en las células normales que en las células resistentes a la droga: eliminaría toxinas del interior celular.

Una estrategia de supervivencia que se remonta muy atrás en la historia evolutiva consiste en que un organismo segregue compuestos tóxicos, para los cuales él es inmune, y matar así a los organismos competidores de su entorno. Algunas de las drogas anticancerosas en uso hoy día –y muchos de los antibióticos– son toxinas producidas por organismos inferiores precisamente para ese fin.

El desarrollo de un gen que protegiera a un organismo frente a tales toxinas le hubiera conferido una enorme ventaja evolutiva. El gen de la P-gli-

coproteína podría ser descendiente muy evolucionado de un gen primordial, que hubiera defendido, a los organismos superiores, de las toxinas naturales a las que se hallan expuestos a través de la ingestión de alimentos alterados por deterioro o bien por contaminación con una u otra de las incontables plantas tóxicas que existen.

Vayamos con la segunda teoría: la P-glicoproteína se hallaría implicada en un proceso de transporte crítico para la fisiología o el desarrollo de un organismo de la complejidad del mamífero. Con sondas de ADNc y con anticuerpos monoclonales se ha determinado que la P-glicoproteína se expresa normalmente en los riñones, en las cápsulas suprarrenales, en el hígado y en partes del tracto gastrointestinal del adulto. Estos tejidos están implicados en el transporte de nutrientes y solutos, así como en la secreción de diversas sustancias proteicas y esteroideas. La P-glicoproteína podría intervenir en alguno de los procesos.

El hecho de que se encuentre P-glicoproteína en los tejidos mencionados no excluye la primera teoría, pues hay órganos implicados en procesos de desintoxicación. Interesa señalar, por otro lado, que tales órganos desencadenan frecuentemente tumores que oponen una resistencia natural a las drogas; es decir, desde su inicio no responden a la quimioterapia de combinación. La expresión normal de la P-glicoproteína en estos tejidos la conservarían, así, las células cancerosas que allí se originan. Cualquiera que fuere el funcionamiento normal de la P-glicoproteína, parece probable que tome parte en alguna clase de transporte a través de la membrana, bien sea la expulsión de sustancias tóxicas exógenas o de productos celulares endógenos de interés fisiológico.

El círculo argumentativo sobre el estudio experimental de la resistencia a la droga se cierra con otra importante cuestión: ¿tiene algo que ver la P-glicoproteína con el fracaso de la quimioterapia en los pacientes cancerosos? En carcinomas de ovario, leucemias y varios tipos de sarcomas se sabe que algunos tumores contienen elevados niveles de P-glicoproteína. Para cierto número restringido de casos, en los que se procedió a un seguimiento continuo del paciente, la concentración de P-glicoproteína aumentaba con la falta de respuesta a la quimioterapia. En un 10 o 20 por ciento de los tumores estudiados se comprobó que habían subido los niveles de P-glicoproteína. Basándose en estos estudios provisionales podríamos concluir que una fracción significativa de los fracasos registrados en el tratamiento corresponde a la resistencia a múltiples drogas mediada por la P-glicoproteína, aunque es preciso investigar bastante más para dar por segura semejante conclusión.

Conforme profundizamos en el conocimiento de la resistencia a múltiples drogas y de la función de la P-glicoproteína, se van aclarando los caminos a seguir para mejorar las drogas administradas en quimioterapia. Se acaba de descubrir, en diversos compuestos, que inhiben la función de la P-glicoproteína promoviendo que las células tumorales resistentes a múltiples drogas se tornen sensibles a las mismas. Nos referimos a los "quimiosensibilizadores". Las investigaciones provisionales apuntan la posibilidad de que algunos bloqueen la unión de las drogas a la P-glicoproteína. Se supone, en efecto, que la unión de una molécula del fármaco a la P-glicoproteína constituye un primer paso decisivo para su transporte hacia el exterior celular. El bloqueo de la unión permitiría, por contra, que el fármaco se acumulara en la célula y la matara. (Este era el objetivo perseguido en un principio.) Se desarrollarán, sin duda, métodos más sutiles para manipular la función de la P-glicoproteína, que permitirán aprovechar el potencial de las drogas anticancerosas; suelen poseer éstas suma eficacia cuando no encuentran resistencia a las mismas.

Otra posible vía para aniquilar las células tumorales resistentes sería, quizás, la de explotar su contenido de P-glicoproteína. Se trataría de que anticuerpos monoclonales que portan un compuesto radiactivo o una droga tóxica sirvan de marcadores de P-glicoproteína para así matar las células tumorales que no se puedan curar con los métodos al uso. Todavía es posible hacer realidad el sueño de la "bala mágica" que imaginó Paul Ehrlich.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE GENETIC ORIGIN OF DRUG RESISTANCE IN NEOPLASMS: IMPLICATIONS FOR SYSTEMIC THERAPY. James H. Goldie y Andrew J. Coldman en *Cancer Research*, vol. 44, n.º 9, págs. 3643-3653; septiembre de 1984.

MULTIDRUG RESISTANCE. James H. Gerlach, Norbert Kartner, David R. Bell y Victor Ling en *Cancer Surveys*, vol. 5, n.º 1, págs. 25-46; 1986.

RESISTANCE TO MULTIPLE CHEMOTHERAPEUTIC AGENTS IN HUMAN CANCER CELLS. Michael M. Gottesman e Ira Pastan en *Trends in Pharmacological Science*, vol. 9, págs. 54-58; febrero de 1988.

Aceleradores de partículas mediante plasma

Los campos eléctricos generados en los plasmas impulsan electrones a energías elevadas. El proceso promete campos 10.000 veces más intensos que los alcanzados mediante los aceleradores más potentes

John M. Dawson

Lanzando partículas cargadas unas contra otras a velocidades próximas a la de la luz, los aceleradores de alta energía nos han permitido avanzar en el conocimiento de la estructura de la materia, de las fuerzas fundamentales de la naturaleza y del origen del universo. En los años treinta, los ciclotrones, que generaban energías de un millón de electronvolt (MeV), simulaban las condiciones existentes en los núcleos de las estrellas gigantes y provocaban en el laboratorio las condiciones para el estudio de las reacciones nucleares. Más recientemente, los sincrotrones y los aceleradores lineales, a mil millones de electronvolt (GeV), han explorado las condiciones existentes en el interior de las estrellas de neutrones y han demostrado la existencia de la antimateria. Los sincrotrones de protones actuales, a un billón de electronvolt (TeV), analizan cómo era el universo una milmillonésima de segundo después de su nacimiento.

A medida que avanza el proyecto del mayor acelerador del mundo, el supercolisionador superconductor, la técnica de la aceleración se ha ido aproximando al límite de sus posibilidades reales. Afortunadamente ha surgido una técnica nueva: la aceleración de partículas mediante plasma, que puede convertirse en un camino prometedor para conseguir energías aún mayores.

El supercolisionador superconductor (SSC), que costará 4400 millones de dólares, necesitará un anillo de aceleración de 87 kilómetros para empujar las partículas hasta 40 TeV [véase "El supercolisionador superconductor", por J. David Jackson, Maury Tigner y Stanley Wojcicki; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, mayo de 1986]. El ingente tamaño del SSC se debe, en parte, a su base de funcionamiento, la misma que ha dominado el diseño de los aceleradores durante 50 años: conduce las partículas mediante campos magnéticos y las impulsa mediante intensos campos eléctricos. Si se quisiera construir un acelerador tan potente como el SSC, pero de menor tamaño, debería aumentarse la intensidad de los campos que guían e impulsan las partículas. Ahora bien, la técnica al uso no es capaz de proporcionar incrementos importantes de las intensidades de los campos. Ello se debe a dos motivos. Primero, las fuerzas de los campos magnéticos están adquiriendo mayor intensidad que las fuerzas estructurales que mantienen unido un material magnético: los imanes que producen estos campos se autodestruirían. Segundo, la energía de los campos eléctricos está llegando a las energías que ligan los electrones a los átomos: separarían a los electrones de los núcleos en las estructuras de soporte del acelerador.

Los aceleradores de partículas mediante plasma pueden resolver el problema del campo eléctrico. Tales aceleradores se apoyan en el principio según el cual las partículas pueden acelerarse mediante los campos eléctricos que se generan en el interior de un plasma; llámase así al estado de la materia calentado a temperaturas en las que los electrones son arrancados de sus átomos hospedadores. Por hallarse ionizado el plasma, estos aceleradores de partículas no quedan sometidos a la disociación de los electrones. En teoría, pueden soportar campos acelerantes miles de veces más intensos que con las técnicas al uso. Si se pueden producir campos acelerantes de tal magnitud a distancias grandes, un acelerador de partículas mediante plasma de unos pocos centenares de metros de longitud puede adquirir la energía proyectada del supercolisionador superconductor de 87 kilómetros.

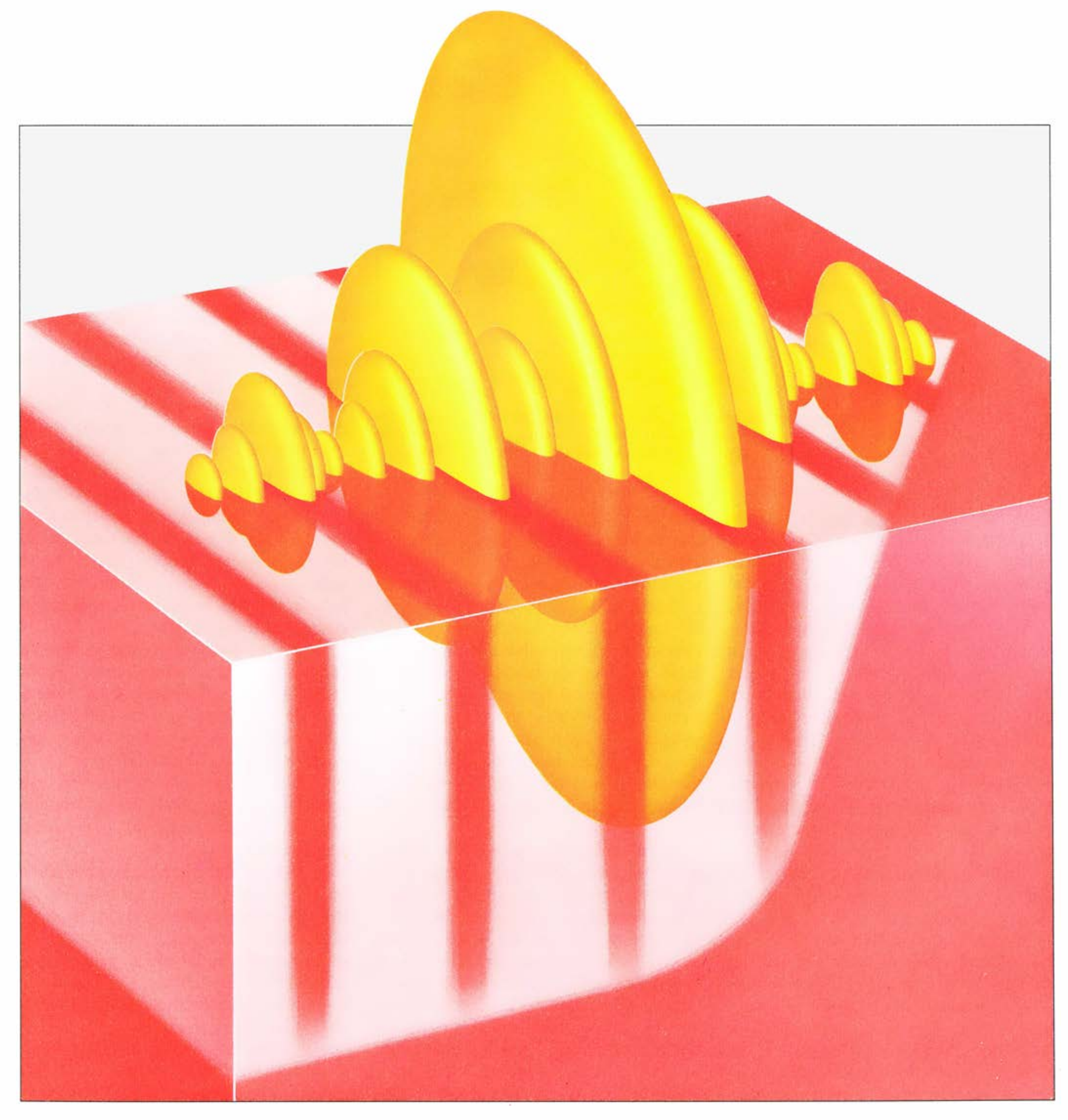
Los campos eléctricos que aceleran partículas pueden crearse en un plasma merced a las notables propiedades de ese medio. Un plasma es eléctricamente neutro en conjunto; ahora bien, por estar separados los electrones y los iones positivamente cargados, cualquier perturbación creará regiones de carga negativa (alta concentración de electrones) y regiones de carga positiva (alta concentración de iones positivos). Tal distribución de carga establece un campo eléctrico que va de las regiones positivas a las negativas. El campo eléctrico empuja los electrones y los iones a la vez, con la misma fuerza. Siendo la masa de un electrón mucho menor que la de un ion, los electrones correrán hacia las regiones positivas, mientras que los iones permanecerán estacionarios.

A medida que los electrones de las zonas negativas pasan a las regiones positivas, van ganando velocidad y momento. El momento no se limita a llevar los electrones hasta una región positiva: provoca que trasciendan dicha región, con lo que el campo eléctrico se invierte, oponiéndose primero al movimiento de los electrones, frenándolos para empujarlos después hacia atrás.

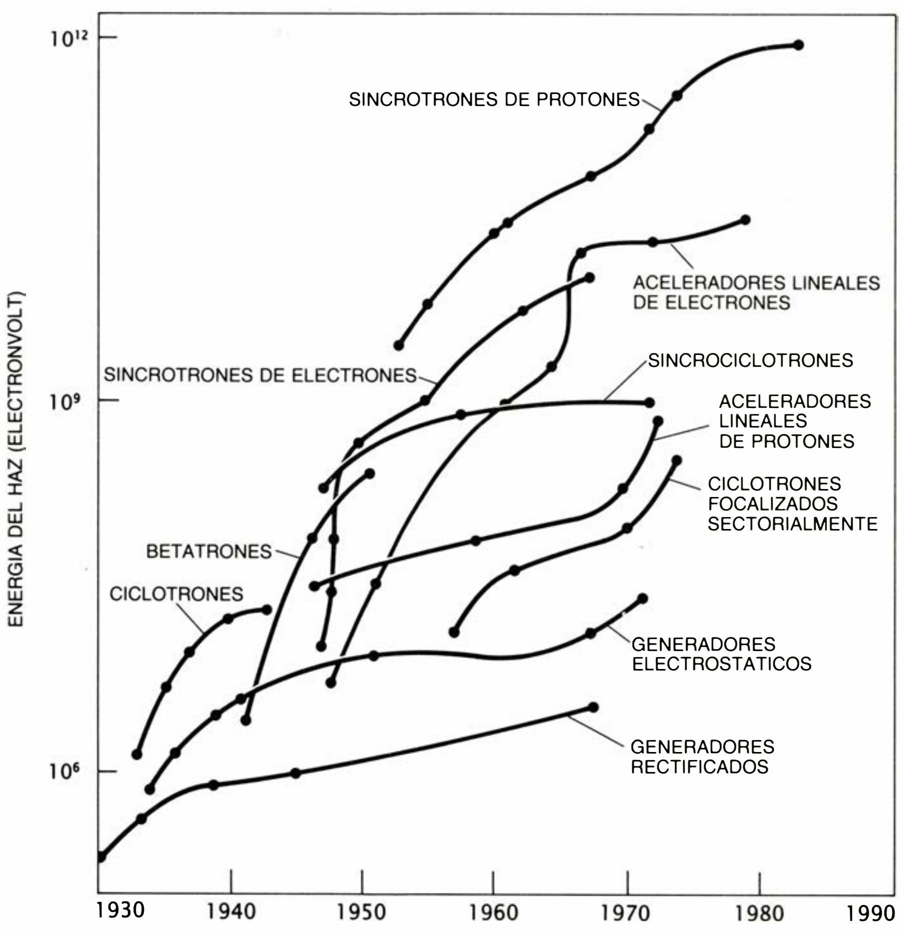
JOHN M. DAWSON es profesor de física y miembro del Centro de Física de Plasma y Energía de Fusión de la Universidad de California en Los Angeles, del que ha sido director. Se formó en la Universidad de Maryland. Ha ganado el premio James Maxwell de física de plasma de la Sociedad Norteamericana de Física. Sus intereses profesionales comprenden la fusión termonuclear, la teoría y las simulaciones de plasmas mediante ordenador. John M. Dawson también es aficionado a la astronomía.

El proceso se repite, estableciéndose así un "péndulo" electrónico.

Una serie de tales péndulos electrónicos, creados por perturbaciones del plasma, pueden generar un campo eléctrico que acelere las partículas cargadas. Imaginemos un cilindro delgado de plasma, con su eje largo horizontal. Cada péndulo electrónico se halla centrado en un punto diferente del cilindro; oscila a izquierda y derecha, paralelamente al eje. Supongamos que los péndulos oscilen secuencialmente. Imaginemos que un péndulo del extremo izquierdo del cilindro del plasma ocupe su posición más a la izquierda. A pequeña distancia, en el transcurso del cilindro de plasma, otro péndulo electrónico se halla en posición central; a continuación, hay un péndulo en su posición más a la derecha. Viene después un péndulo en su posición central y, luego, otro en su posición más a la izquierda [*véase la figura 3*]. Si todos estos péndulos electrónicos empezaran a oscilar con la misma frecuencia, alcanzando la misma amplitud máxima, daría la impresión de que las regiones de carga negativa (positiva) se moverían por el cilindro, como una onda en avance. El efecto recordaría las luces indicadoras de un centro nocturno: aunque cada bombilla se enciende y se apaga sucesivamente, las ondas luminosas parecen moverse a través del anuncio.



1. LLAMAMOS PLASMA al estado de la materia en el que los electrones se disocian de los iones; alberga ondas de carga (*rojo*). Las ondas se generan mediante dos haces de luz láser que crean una figura de interferencia conocida como onda pulsante (*amarillo*). A medida que la onda pulsante penetra en el plasma sin perturbar, la presión de radiación de la onda hace que los electrones oscilen de suerte que se muevan regiones cargadas. La onda crea un campo eléctrico.



2. ENERGIAS GENERADAS en los aceleradores de partículas de altas energías; han crecido en un factor superior al millón desde el año 1930. Cada línea representa el avance de un tipo de tecnología de aceleración de partículas (ciclotrones, betatrones, sincrotrones, etc.). Cada punto señala la energía a la que ha llegado.

Así, los movimientos combinados de los péndulos electrónicos forman una onda longitudinal de regiones positivas y negativas que se desplaza a través del plasma, una onda de plasma. A su vez, las regiones positivas y negativas establecen un campo eléctrico que viaja con la onda de plasma. Si se inyecta una partícula cargada en el plasma, a la misma velocidad aproximadamente que la onda de plasma, permanecerá en fase con el campo, absorberá energía del campo y se acelerará uniformemente. Este fenómeno constituye la base de la aceleración de partículas en plasma.

La aceleración de la partícula no sigue la noción intuitiva que la asocia a un aumento de la velocidad con el tiempo. Las partículas cargadas viajan, en los aceleradores de alta energía actuales, casi a la velocidad de la luz. La velocidad de un electrón de un acelerador de 50 GeV dista de la velocidad de la luz cinco partes en 10^{11}; en un ejemplo: si un electrón así compitiera con un pulso luminoso en dar una vuelta a la Tierra, cruzaría la línea de llegada tan sólo una décima de milímetro detrás de la luz. Cuando las partículas que viajan a estas velocidades absorben energía de un campo, se aceleran en el sentido de que su masa aumenta según la teoría de la relatividad de Einstein. Sin embargo, la velocidad de la partícula aumenta muy poco. A fin de acelerar un haz de partículas cargadas (añadirles masa) que ya se mueven a velocidad muy alta, un acelerador de plasma debe crear una onda de plasma que viaje a casi la velocidad de la luz, de manera que las partículas cargadas no dejen atrás la onda del campo eléctrico.

La velocidad de una onda de plasma es el producto de su longitud de onda (la distancia entre una región negativa y la siguiente) por la frecuencia (el ritmo con el que oscilan los péndulos electrónicos). La frecuencia de la onda de plasma en un plasma dado está fijada; es una función de la densidad de electrones disponibles. Sin embargo, la longitud de onda es variable. Por tanto, la velocidad de una onda de plasma puede igualarse a la velocidad de la luz confiriéndole la longitud de onda adecuada. Dada una onda de plasma con la frecuencia propia del plasma y la longitud de onda debida, se pueden inyectar partículas cargadas en el plasma de manera que permanezcan en fase con la onda, ganando gradualmente energía del campo eléctrico.

Existe una limitación sobre la cantidad de energía que una onda de plasma puede impartir a un electrón. El campo eléctrico más intenso que puede producirse en un plasma está fijado por la amplitud máxima de las oscilaciones, y ésta a su vez se halla determinada por la rotura de la onda. De la misma manera que una ola marina se rompe cuando su cresta cae dentro de su valle, una onda de plasma puede romperse cuando un conjunto de péndulos electrónicos alcanzan una región antes de que los péndulos electrónicos de otra región la hayan abandonado. Para una onda de plasma que tiene una velocidad de fase igual a la velocidad de la luz, la teoría predice que la amplitud límite debida a la rotura de la onda está relacionada con la raíz cuadrada de la densidad de electrones no perturbada. En los laboratorios se producen plasmas que tienen densidades comprendidas entre 10^{16} y 10^{21} electrones por centímetro cúbico, de manera que los campos acelerantes más intensos están comprendidos, en teoría, entre 100 millones y 30.000 millones de volt por centímetro. Por mor de comparación, se generan campos acelerantes de 200.000 volt por centímetro en las máquinas existentes y se proyectan campos de uno o dos millones de volt por centímetro en los futuros aceleradores convencionales.

Como las ondas de plasma prometen campos eléctricos más intensos que las técnicas al uso, constituyen un motivo de esperanza para acelerar partículas a alta energía. Ahora bien, ¿cómo se generan las ondas de plasma? Se han propuesto y comprobado ya dos métodos para crear ondas de plasma en aceleradores: el campo de estela y el campo pulsante.

El método del campo de estela aprovecha un "paquete" de muchos electrones para generar ondas en un plasma, acelerando, por tanto, un grupo de unos cuantos electrones a energías mayores. De manera similar al avance de un bote por el agua, que la desplaza hacia los lados y forma una estela, un paquete de muchos electrones que viaje a través de un plasma genera una estela de ondas de plasma.

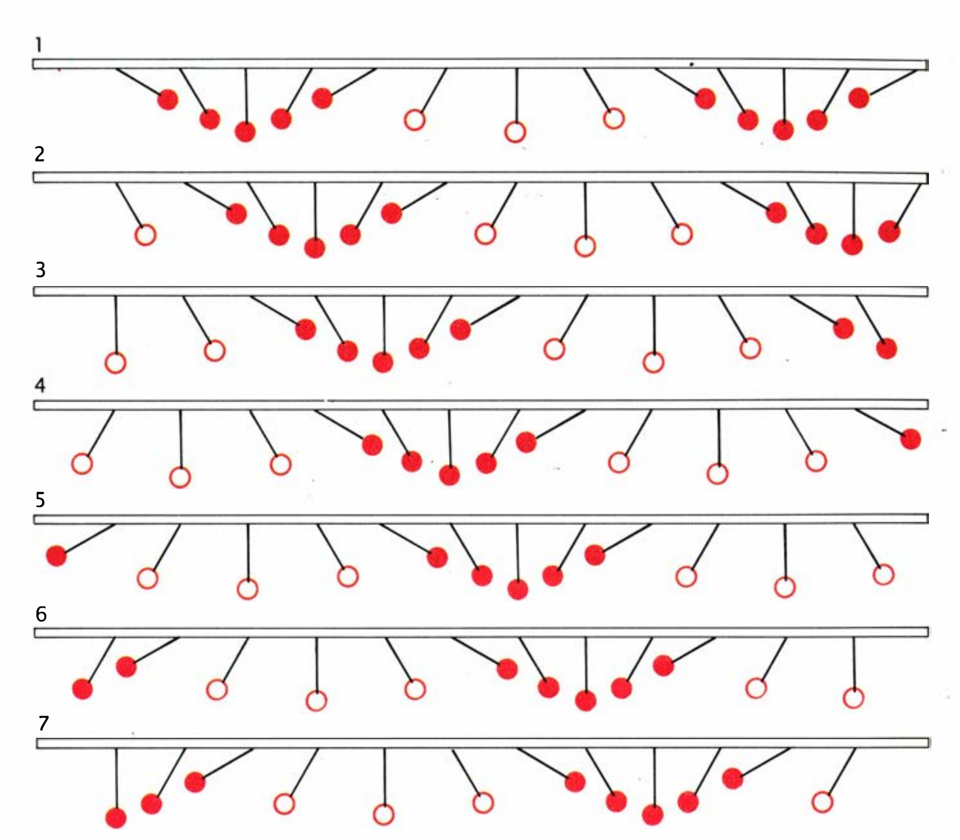
Cuando un paquete de electrones penetra en una región, los electrones del

plasma se apartan de su camino: la combinación del plasma y del paquete permanece, pues, eléctricamente neutra. Cuando el paquete de electrones sale, dejando un déficit de electrones en la zona, los electrones del plasma retornan para restablecer el equilibrio. Este movimiento de los electrones del plasma inicia la oscilación de los péndulos electrónicos y produce una onda de plasma que viaja a una velocidad igual a la del paquete de electrones. La onda de plasma establece un campo eléctrico: el llamado campo de estela. Unos cuantos electrones, adecuadamente colocados en el campo de estela, pueden acelerarse entonces a energías mayores que las del paquete que los guía.

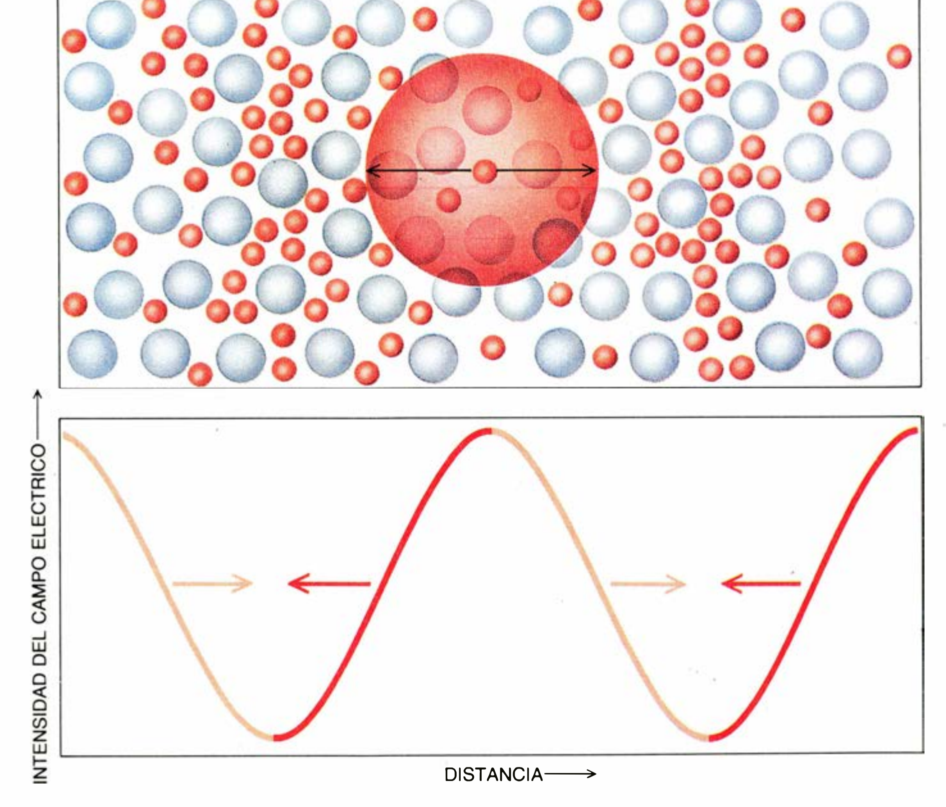
Sin embargo, los electrones del plasma se resisten, hasta cierto punto, a ser ladeados por el paquete guía; reducen, por tanto, la energía disponible para producir ondas de plasma. Esta resistencia puede debilitarse si conferimos una forma adecuada al paquete de electrones, de suerte tal que la densidad de electrones primero aumente lentamente y después decrezca deprisa. De este modo, los electrones del plasma se ajustan fácilmente al paquete entrante, si bien quedan después sometidos a amplias oscilaciones. Diseñando un modelo computacional para este proceso, Jao-Jang Su, de la Universidad de California en Los Angeles, ha demostrado que un paquete de 75 MeV, bien conformado, puede acelerar electrones hasta 1000 MeV.

La turbulencia puede romper las ondas de plasma y conducir también a pérdidas importantes de energía, al producir inestabilidades en el paquete guía y en el grupo de electrones acelerados. El paquete guía se halla más expuesto a dichas inestabilidades, porque tiene más electrones y menos energía que el grupo acelerado. Hay dos tipos críticos de inestabilidad en el paquete guía: la inestabilidad de dos corrientes y la inestabilidad de Weibel.

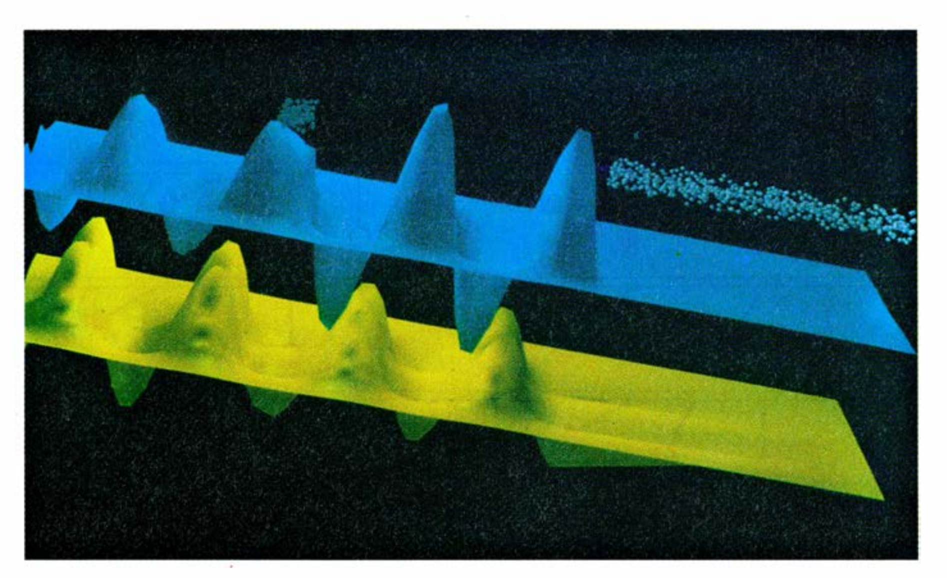
La inestabilidad de dos corrientes se desarrolla cuando algunos electrones del paquete se mueven más deprisa que otros. A medida que el paquete avanza a través del plasma, esa diferencia de velocidad se agranda y disminuye la potencia productora de ondas de plasma. Las simulaciones de Su indican que, a pesar de la inestabilidad de dos corrientes, una onda de plasma puede absorber aproximadamente el 80 por ciento de la energía del paquete guía antes de que se rompa.



3. UNA ONDA VIAJERA se desarrolla en una fila de péndulos que oscilan a izquierda y derecha de un punto estacionario. Cada péndulo está en una fase de oscilación, pero todos presentan la misma frecuencia y amplitud. Con el tiempo, un paquete de péndulos (*rojo continuo*) procede de izquierda a derecha.



4. DE LA MISMA MANERA QUE LOS PENDULOS oscilantes pueden formar paquetes que avanzan, los electrones oscilantes de un plasma pueden disponerse de suerte tal que constituyan una onda de plasma viajera. Una sección transversal de una onda de plasma (*ilustración superior*) muestra conjuntos de electrones móviles (*rojo*) entre iones estacionarios (*gris*). La zona coloreada indica la región en la que normalmente oscila un electrón. La gráfica inferior ilustra la intensidad y dirección del campo eléctrico que se ha creado.



5. ESTELA dejada por un paquete de muchos electrones (*derecha*) que avanzan por un plasma; genera ondas de plasma y, por tanto, crea un campo eléctrico. En esta simulación mediante ordenador se indican las dos componentes del campo: la axial (*azul*) y la radial (*amarillo*). La componente axial del campo eléctrico acelera un grupo de algunos electrones (*izquierda*). La intensidad del campo axial es pequeña cerca de este grupo, lo que indica que la energía del campo se absorbe. El campo radial focaliza el grupo hacia el eje.

En la inestabilidad de Weibel, el paquete guía se subdivide dentro del plasma y se contrae en varios "filamentos" concentrados. Cada electrón del paquete guía corre paralelo a los otros y constituye una corriente eléctrica independiente. Como las corrientes paralelas se atraen entre sí, los electrones del paquete tienden a juntarse más. De manera global, el paquete no se contrae uniformemente; antes bien, sucede que grupos de electrones se juntan para formar filamentos.

Controlaremos la inestabilidad de Weibel dando a los electrones del paquete guía cierto movimiento aleatorio perpendicular a la dirección del paquete. El movimiento aleatorio tiende a dispersar cualquier filamento que se forme. Una energía transversal de unos 50.000 eV, que se genera fácilmente, es suficiente para estabilizar paquetes de energías de 100 MeV. Aunque esta energía transversal adicional tendería a dispersar demasiado el paquete, ello puede compensarse introduciendo un campo magnético guía. Suponiendo que la inestabilidad de Weibel se mantenga bajo control, Thomas C. Katsouleas y Scott C. Wilks, de UCLA, han descubierto que el rendimiento en la transferencia de energía, desde el campo de estela hacia las partículas aceleradas, es del 30 por ciento.

Estos resultados han recibido confirmación parcial con la primera prueba experimental de un acelerador de campo de estela. El experimento fue iniciado por David B. Cline, de UCLA y de la Universidad de Wisconsin en Madison, en colaboración con investigadores del Laboratorio Nacional de Argonne. James B. Rosenzweig, de Wisconsin, construyó la fuente de plasma, y James D. Simpson, de Argonne, dirigió la conversión de un acelerador lineal de 20 MeV en una fuente de paquetes de electrones destinados a producir el campo de estela.

Una pequeña fracción de los electrones generados por el acelerador lineal proporcionó los electrones que debían acelerarse en el campo de estela. Los electrones atravesaban una lámina delgada, deceleraban hasta 15 MeV y se desviaban magnéticamente del paquete principal. El grupo de 15 MeV penetraba entonces en un plasma, detrás del paquete guía, y funcionaba como un pulso de prueba. La modelación mediante ordenador de este experimento, realizada por Rhonald K. Keinigs y Michael E. Jones, de Los Alamos, y por Su, indicó que, en su funcionamiento óptimo, la estela podría acelerar electrones a 300.000 volt por centímetro. Hasta ahora, el experimento real sólo ha logrado 50.000 volt por centímetro, debido a que había menos electrones en el paquete guía que los que se esperaban. Sin embargo, el experimento mostró la aceleración mediante un campo de estela.

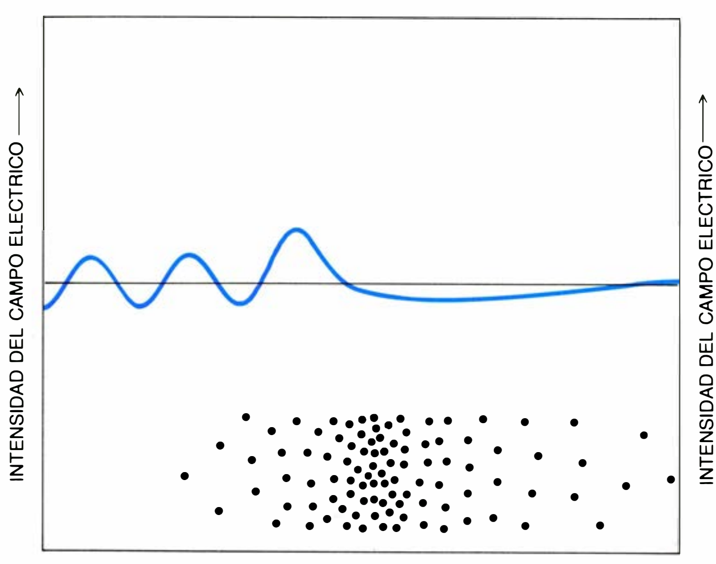
El método de la onda pulsante ha merecido mayor atención de los físicos, teóricos y experimentales, que el método del campo de estela. Los aceleradores de onda pulsante ya han acelerado partículas en laboratorio, desde 0,5 a 2 MeV, y han generado campos eléctricos cuya intensidad decuplica la adquirida en los aceleradores tradicionales más avanzados.

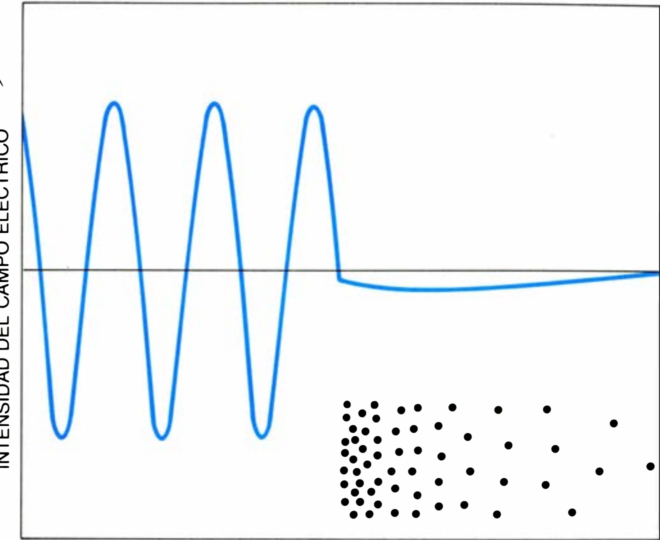
En vez de emplear un paquete de electrones, el método de la onda pulsante genera ondas de plasma a partir de dos haces láser intensos cuya luz tiene frecuencias distintas. Los haces se combinan de suerte tal que se interfieran las ondas luminosas y formen regiones alternantes en las que las dos ondas están en fase (y se refuerzan) y regiones donde están desfasadas (y se cancelan). El resultado es una onda compuesta pulsante que oscila a una frecuencia igual a la diferencia de frecuencias de los haces originales. Si el haz resultante se focaliza entonces hacia un plasma, crea regiones de alta y baja presión de radiación. Si la frecuencia de los pulsos es igual a la frecuencia de oscilación natural del plasma, los electrones del plasma responden resonantemente y producen potentes ondas de plasma.

En el proceso de la onda pulsante, tanto la evolución de la onda de plasma como la propagación de los dos haces láser a través del plasma son muy complejos. Se han construido modelos de ordenador que siguen el movimiento de varios millones de partículas cargadas a través de los campos electromagnéticos generados por las partículas y los láseres. Cada partícula del modelo representa, de hecho, un gran número de electrones del plasma, pero el modelo emula muy de cerca la naturaleza —incluyendo efectos relativistas— y ha tenido mucho éxito en la predicción del complejo comportamiento de las ondas pulsantes que interaccionan con los electrones y los iones del plasma.

Joseph M. Kindel y David W. Forslund, del Laboratorio Nacional de Los Alamos, y Warren B. Mori, de UCLA, han modelizado la interacción entre un plasma que tiene una densidad de 10^{17} electrones por centímetro cúbico y dos haces láser, de longitudes de onda de 9,6 y 10,6 micras, respectivamente, intensidades de unos 10^{16} watt por centímetro cuadrado. Estos valores son parecidos a los ya logrados en los experimentos. En su simulación, Kindel, Forslund y Mori lograron un campo acelerante según el eje del haz láser de aproximadamente el 50 por ciento del valor máximo en teoría posible, lo que sugiere que el método de la onda pulsante nos pone al alcance campos eléctricos de extrema intensidad.

Los modelos de ordenador han ayudado también a acotar qué problemas deben resolverse para disponer de un acelerador estable y eficiente. Si el haz





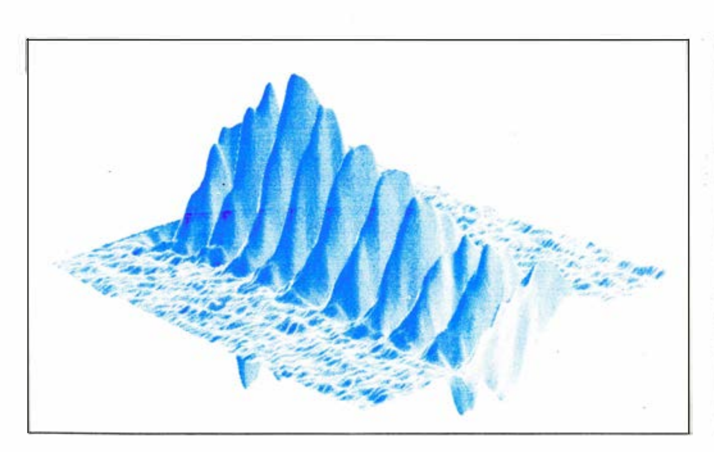
6. INTENSIDAD del campo de estela en función de la distancia; depende de la forma del paquete guía de electrones. Un paquete cuya densidad aumente y disminuya lentamente forma un campo eléctrico débil. Un paquete cuya densidad aumente lentamente y se anule de manera abrupta forma un campo intenso.

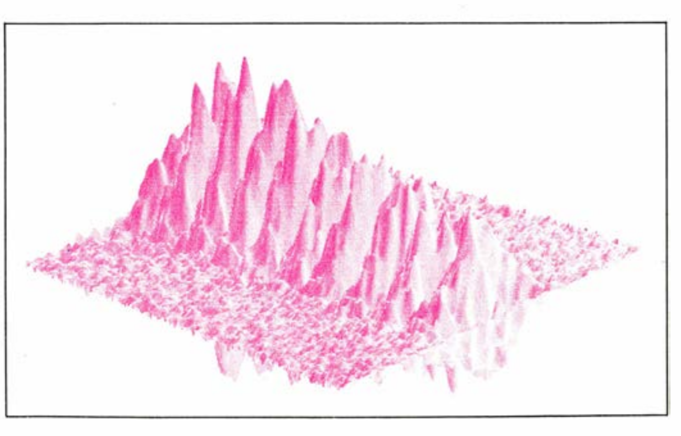
láser compuesto no permanece focalizado en su avance por el plasma, por ejemplo, el haz carecerá de poder suficiente para generar ondas pulsantes a grandes distancias. Normalmente, la anchura de un haz láser crece gracias a la difracción. Las propiedades ópticas insólitas de la luz intensa en un plasma tienden a focalizar los haces láser. Ambos, teoría y modelos de ordenador, revelan que la anchura de un haz láser de suficiente intensidad permanece estable (a unos 0,2 milímetros en el modelo de Forslund, Kindel y Mori). Tal focalización es esencial para la estrategia de la onda pulsante, ya que un acelerador de plasma exigirá que los haces láser se propaguen a grandes distancias.

Como el haz, los electrones que se aceleran con la onda de plasma deben permanecer también focalizados en un paquete coherente, en el centro de la onda de plasma. Afortunadamente, las ondas de plasma generadas por haces láser no sólo crean campos eléctricos acelerantes a lo largo del eje del haz láser, sino que producen también campos eléctricos radiales. Estos campos radiales pueden focalizar los electrones hacia el eje. Dos efectos adicionales ayudan a la focalización. Primero, el canal de plasma tiende a quedar cargado positivamente, debido a que la presión de radiación de la luz ejerce un empuje hacia afuera sobre los electrones del plasma. Segundo, la corriente promovida por los electrones acelerados produce intensos campos magnéticos confinantes. Si los electrones acelerados se focalizan hacia el eje, su avance prosigue y no pierden ninguna cantidad importante de energía.

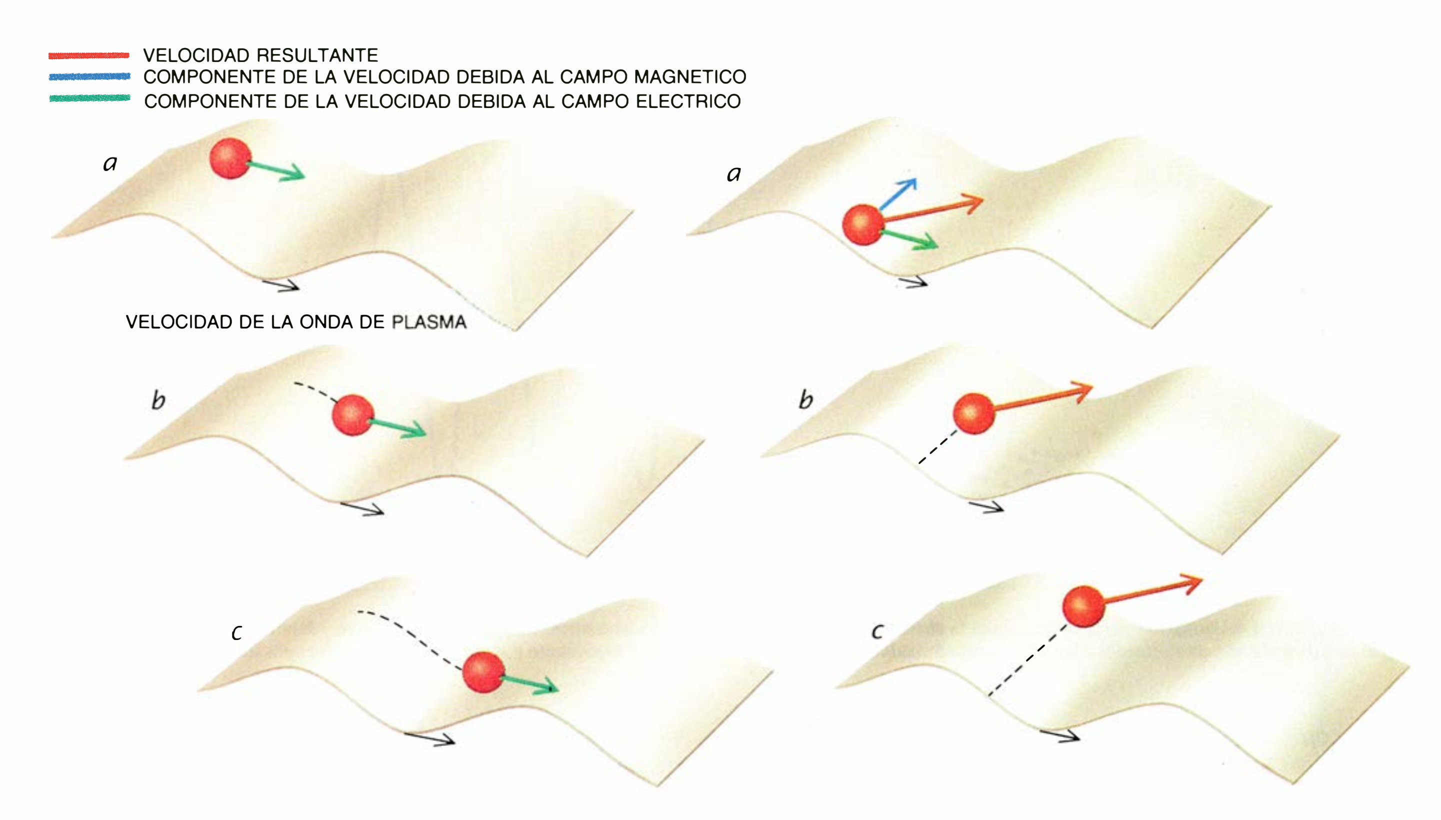
Sin embargo, el haz láser puede ocasionalmente producir turbulencia que rompe la formación de ondas de plasma. Tal turbulencia surge cuando no sólo los electrones, sino también los iones positivos de un plasma reaccionan con el haz láser; los iones deben permanecer estacionarios a fin de producir ondas de plasma eficaces. Pero los iones se moverán si el haz láser se focaliza sobre una región de un plasma durante más de 10^{-10} segundos. Basta ese tiempo para que la presión de radiación del haz láser empuje los iones hacia fuera de la región del haz. Por tanto, si un pulso de láser que no dure 0,1 nanosegundos viaja a través de un plasma sin perturbar, el pulso se propagará durante muchos metros y generará una onda de plasma no turbulenta.

La creación de ondas de plasma que tengan velocidad suficiente para acelerar partículas de manera eficiente presenta otra dificultad técnica. La velocidad con la que una onda pulsante y la onda de plasma se propagan a través del plasma depende de la frecuencia natural del plasma y de la frecuencia de





7. LA ONDA DE PLASMA (*izquierda*) de una simulación, diseñada a través de ordenador, del método de la onda pulsante genera un campo eléctrico (*derecha*). Si un grupo de partículas cargadas se inyectara en el interior de un plasma y se moviese en fase con el campo eléctrico engendrado, se aceleraría entonces.



8. EXIGE LA ACELERACION ESTABLE de un electrón que éste permanezca en fase con el campo eléctrico de la onda de plasma. Si el electrón (*izquierda*) viaja algo más deprisa que la onda de plasma y la supera, el electrón no se acelerará e incluso puede frenarse. Si el electrón (*derecha*) viaja ligeramente más deprisa que la onda y se aplica un campo magnético para que el electrón forme un ángulo con la onda, el electrón permanecerá en fase y se acelerará siempre.

los láseres que producen la onda pulsante. Ello impone un límite a la energía alcanzable por los electrones acelerados. Por ejemplo, láseres que radien a una frecuencia de 10^{15} hertz y un plasma que tenga una frecuencia natural de 10^{12} hertz podrían dar aceleraciones de electrones de hasta 100 millones de volt por centímetro y energías máximas próximas a 1 TeV.

El límite de energía puede superarse, sin embargo. Si los electrones acelerados se mueven formando un ángulo con la dirección de propagación de la onda, los electrones deben moverse más deprisa que la propia onda, a fin de mantenerse en ella. Se puede provocar que los electrones acelerados se muevan formando un ángulo adecuado aplicando un campo magnético perpendicular a la dirección de la onda de plasma. Cabalgar sobre ondas en ángulo constituye una estrategia utilizada por los practicantes del surf cuando quieren deslizarse más deprisa y lograr un paseo más largo. En su evocación, se ha dado el nombre de surfatrón al hipotético acelerador basado en dicha estrategia.

Poco después de que Toshiki Tajima, de la Universidad de Texas en Austin, y el autor publicasen el primer trabajo teórico sobre el método de la onda pulsante en 1979, empezaron los experimentos de Chandrashekhar J. Joshi y sus colaboradores del Consejo Nacional de Investigación del Canadá en Ottawa. Para crear un plasma, focalizaron un potente haz láser de dióxido de carbono sobre una delgada lámina de carbono. Sin embargo, en vez de combinar dos haces láser adicionales para crear una onda pulsante en el plasma, aprovecharon una interacción en-







9. ROTURA DE LAS ONDAS DE PLASMA cuando la presión de radiación de la luz láser empuja los iones fuera del canal de láser. En este caso, se focaliza un láser sobre un plasma de manera continua durante 15 picosegundos. A los 8 picosegundos, los iones están distribuidos uniformemente. A los 10 picosegundos, los iones empiezan a abandonar el canal del láser; a los 15, han quedado expulsados del canal del láser, perturbando mucho las ondas de plasma.

tre el primer láser y el plasma. La interacción generó ondas luminosas secundarias cuyas frecuencias se diferenciaban de la frecuencia del haz original en la frecuencia del plasma. La interferencia entre la luz secundaria y el haz láser original formó ondas de plasma mediante un mecanismo muy parecido al proceso de la onda pulsante, excepto en que las ondas de plasma se propagaban en todas direcciones. Este experimento dio resultados toscos, pero esperanzadores: se generaron ondas de plasma intensas y se produjeron campos eléctricos de unos 10 millones de volt por centímetro.

Joshi prosiguió esta investigación en UCLA. Allí construyó un dispositivo experimental que produciría las ondas de plasma directamente y las mediría cuantitativamente. Esta vez generó una onda pulsante con pulsos sincronizados de un nanosegundo de longitud, a partir de dos láseres de dióxido de carbono de longitudes de onda de 9,6 y 10,6 micras. La frecuencia de la onda pulsante coincidía con la frecuencia del plasma. Joshi dirigió la onda pulsante hacia un plasma formado mediante una chispa eléctrica. Detectó ondas de plasma dispersando un tercer láser por la onda de plasma y observó campos eléctricos cuyas intensidades estaban entre tres millones y 10 millones de volt por centímetro.

Sin embargo, el experimento presentaba dos puntos débiles. Primero, tal como predecía la teoría, los pulsos de láser de un nanosegundo alcanzaban la suficiente longitud para perturbar los iones del plasma, por lo que se desarrolló un gran número de ondas turbulentas entre los iones, obstaculizando el funcionamiento del acelerador. Segundo, no se aceleraron electrones. Las velocidades de los electrones del plasma eran demasiado bajas para ser aceleradas por la onda de plasma. De la misma manera que los practicantes del surf deben impulsarse para ganar velocidad suficiente y alcanzar una ola marina, también los electrones deben poseer suficiente energía inicial para ser acelerados por la onda pulsante. Joshi espera eliminar la turbulencia acortando las longitudes de los pulsos del láser y está inyectando electrones a una energía inicial elevada: 1,5 MeV. Pretende que los electrones de alta energía se aceleren, con una onda de plasma, hasta 10 MeV.

Otro grupo bajo la dirección de A. E. Dangor, del Colegio Imperial de Ciencia y Tecnología de Londres, y



10. ACELERADOR DE CAMPO DE ESTELA del Laboratorio nacional estadounidense de Argonne. La máquina focalizó un paquete de muchos electrones en un plasma para así generar ondas de plasma. Inmediatamente después del paquete, se inyectó un grupo de unos cuantos electrones en el plasma que permitieran determinar la capacidad aceleradora del aparato: se cifró en unos 50.000 volt por centímetro de plasma.

Roger G. Evans, del Laboratorio Rutherford Appleton en Harwell, está trabajando en un acelerador de onda pulsante que se basa en láseres de cristales de neodimio que producen luz a longitudes de onda de aproximadamente 1 y 1,1 micras. El grupo, que se ha topado con ciertas dificultades experimentales, acaba de obtener pruebas de la generación de ondas de plasma.

Estos investigadores han creado también un plasma reproducible y uniforme, perfecto dentro de los límites de sus medidas. Lo crearon bombardeando rápidamente cada átomo de un gas con fotones de luz y extrayendo, pues, los electrones de casi todos los átomos. Tal plasma uniforme e inactivo puede contener ondas de plasma de alta cualidad; resulta imprescindible para mantener ondas de plasma de más de algunos metros de largo, tanto en los aceleradores de onda pulsante como en los de campo de estela.

François Martin y su grupo, de la Universidad de Quebec, realizaron otro experimento muy parecido al de Joshi. Intervenían dos plasmas, uno aportaba el pulso de electrones acelerados y el otro los aceleraba más, según el método de la onda pulsante. Inicialmente, los electrones se aceleraron a más de 0,5 MeV mediante un proceso parecido al del primer experimento de Joshi. Un haz láser incidió sobre un blanco sólido, creando un plasma de alta densidad de electrones y de alta temperatura. Los electrones más energéticos se extrajeron y se inyectaron en el segundo plasma; estuvieron allí viajando lo bastante deprisa como para acelerarse más, mediante el método de la onda pulsante. Cuando los investigadores analizaron los electrones provenientes de la región de la onda pulsante, registraron energías de hasta 2 MeV. Como la región de la onda pulsante tenía sólo 1,5 milímetros de largo, debían haberse producido campos acelerantes de aproximadamente 10 millones de volt por centímetro.

Se están realizando otras investigaciones adicionales en los Estados Unidos, Canadá, Inglaterra, Francia y Japón. Aunque se han producido campos eléctricos prometedores, es necesario seguir trabajando hasta determinar si los aceleradores de partículas mediante plasmas pueden competir con los aceleradores existentes en energía, intensidad y calidad. Sobrepasar la respetable potencia del supercolisionador superconductor y la impresionante

marca de las técnicas de aceleración desarrolladas durante los últimos 50 años continúa siendo un gran reto para los físicos de plasma.

Además del interés del objetivo primario —diseñar nuevos métodos para acelerar partículas—, la investigación en marcha resulta prometedora en otras áreas de estudio. Puede contribuir a la comprensión de los procesos de aceleración de partículas en la naturaleza. En ese sentido, se cree que los púlsares generan intensas ondas en plasmas que aceleran partículas a energías extremadamente altas en una distancia relativamente corta.

La ulterior investigación en aceleradores de onda pulsante podría llevarnos a nuevas fuentes de rayos X y rayos gamma. Los electrones acelerados por una onda pulsante pueden dirigirse sobre láminas de tungsteno, que entonces emitirían rayos X. Los electrones podrían también inyectarse en una onda de plasma perpendicular a la dirección del campo eléctrico. Estos electrones se acelerarían transversalmente a su dirección de movimiento para que emitan rayos X y rayos gamma.

Las técnicas de ondas de plasma habrán de traer nuevas posibilidades para abordar la interacción entre campos electromagnéticos y plasmas. Las ondas de plasma pueden generar campos eléctricos ingentes; técnicas similares pueden proporcionar, a su vez, campos magnéticos de escala parecida. Y, como en muchas empresas científicas, los resultados más importantes de los estudios sobre aceleración mediante plasma quizá sean del todo inesperados.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

LASER ELECTRON ACCELERATOR. T. Tajima y J. M. Dawson en *Physical Review Letters*, vol. 43, n.º 4, págs. 267-270; 23 de julio de 1979.

ULTRAHIGH GRADIENT PARTICLE ACCELERATION BY INTENSE LASER-DRIVEN PLASMA DENSITY WAVES. C. Joshi, W. B. Mori, T. Katsouleas, J. M. Dawson, J. M. Kindel y D. W. Forslund en *Nature*, vol. 311, n.º 5986, págs. 525-529; 11 de octubre de 1984.

PLASMA-BASED HIGH-ENERGY ACCELERATORS. Editado por T. Katsouleas en *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. PS-15, n.º 2; febrero de 1987.

LASER ACCELERATORS. F. F. Chen en *Physics of Laser Plasma*, editado por A. Rubenchik y S. Witkowski. Elsevier Science Publishing Co., 1989.

PLASMA ACCELERATION OF PARTICLE BEAMS. T. Katsouleas y J. M. Dawson en *Physics of Particle Accelerators*, en prensa.

Ciencia y sociedad

Libertad de investigación y secretos oficiales

La añeja polémica entre los científicos que trabajan en el proyecto de fusión por confinamiento inercial (CF) y sus subvencionadores del Departamento de la Energía está adquiriendo tonos de intenso acaloramiento. El proyecto de investigación declarado reservado pretende que, a través de láseres o haces de partículas, se irradien pequeñas muestras de elementos ligeros para provocar explosiones termonucleares en miniatura y calibrar los efectos de las armas nucleares. A primera vista, la cautela oficial parece justificable.

Ocurre, sin embargo, que, desde hace años, varios grupos europeos y japoneses han venido estudiando y contrastando abiertamente puntos de sus investigaciones reputados secretos por las autoridades norteamericanas. Estos grupos libres, que se han propuesto desarrollar el confinamiento inercial como fuente de energía, están decididos a compartir sus recursos en proyectos internacionales que no queden sometidos a ninguna ley del silencio. Ante esa situación creada, algunos científicos estadounidenses entienden que debe levantarse el secreto de sus investigaciones, posibilidad que niega una y otra vez el Departamento de Energía. Sin esa restricción, podrían participar en las iniciativas internacionales relativas a la cuestión.

Hace ya más de tres años, un informe elaborado por la Academia Nacional de Ciencias sobre el confinamiento inercial aseguraba que el carácter secreto de los trabajos impedía su progreso y recomendaba la creación de una comisión que revisara esa cláusula, al menos para algunos trabajos. Hasta el año pasado no se formó el comité, que, en opinión de Sheldon L. Kahalas, director de la división de confinamiento inercial del Departamento de Energía, ha avanzado muy poco.

El asunto se complica. Por las mismas razones humanas que observamos en otros países: los investigadores del confinamiento inercial se muestran reacios a criticar a los políticos de la administración, ya que temen perder la subvención de sus trabajos, sus becarios o incluso su empleo. Las relaciones entre científicos y burócratas políticos se han ido encrespando. El verano pasado, Kahalas prohibió que expertos del proyecto asistieran a un encuentro con sus colegas japoneses, organizado por George H. Miley, de la Universidad de Illinois, que tuvo lugar en Hawai. Más tarde, Kahalas censuraría a Erik Storm, jefe del proyecto de confinamiento inercial en el Laboratorio Lawrence Livermore, que hubiera firmado una carta en que se pedía una mayor colaboración internacional sobre el tema.

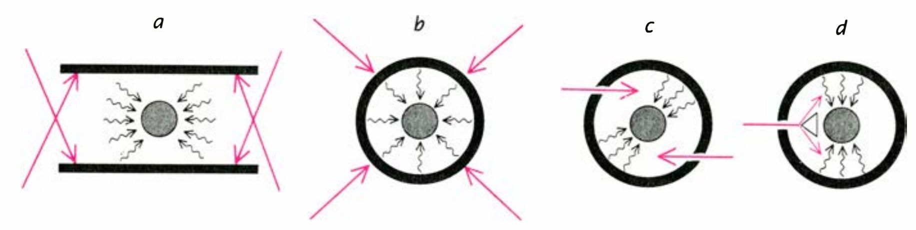
Cree William Happer (de la Universidad de Princeton y presidente del comité que revisó, para la Academia Nacional de Ciencias, el estado de los trabajos sobre confinamiento inercial) que el proyecto, por culpa de su calificación reservada, ha perdido ya y seguirá perdiendo valiosos investigadores que se han sentido frustrados por la politización que ahoga el quehacer investigador. Discrepa también del punto de vista gubernamental y defiende que la difusión de la tecnología del confinamiento inercial no repercutirá en la proliferación de armas nucleares, ya que necesita su propia ingeniería.

Uno de los puntos que el Departamento de Energía considera menos divulgable es la técnica indirecta, basada en un mecanismo utilizado en bombas termonucleares. La muestra de combustible no se irradia directamente por todas partes, sino que se coloca en una cavidad (*Hohlraum*). Cuando la radiación primaria llega a la cavidad, se emiten rayos X que inciden en la muestra. Se da por supuesto que, en los Estados Unidos, investigan esta técnica indirecta, y pueden discutirla en público sólo en términos generales, los físicos de los laboratorios nacionales de Los Alamos, Sandia y Lawrence Livermore.

Los otros grupos internacionales no conocen esos grilletes. En febrero de 1984, *Laser Focus*, revista publicada por la editorial PennWell Publishing, sacó en primera página el trabajo de un equipo de la Universidad de Osaka sobre la técnica indirecta. Los celosos funcionarios de seguridad de Livermoore consideraron peligrosa la ilustración de la portada, que mostraba un dispositivo japonés que utilizaba la técnica indirecta, y la arrancaron del ejemplar que circulaba por el laboratorio.

Pero la investigación sigue su curso. El pasado octubre, el grupo de Osaka informó sobre sus trabajos en un congreso de la Agencia Internacional de la Energía Atómica que tuvo lugar en Francia. En diciembre, la revista de la Asociación Americana de Física, *Physical Review A*, publicó tres artículos de un grupo alemán del Instituto Max Plank de óptica cuántica sobre la misma técnica.

Los políticos llevan, a pesar de todo, las de perder. Comienza a reconocerse como algo obvio que lo único que han conseguido ha sido retrasar el avance de la investigación estadounidense en el confinamiento inercial.



*CAVIDADES USADAS EN LA TECNICA INDIRECTA: suelen ser esferas de oro de milímetros de diámetro. Se han utilizado también cilindros (*a*). Los haces de luz o de partículas (*flechas rojas*) entran a la cavidad a través de agujeros o mediante calor desde fuera (*b*). El revestimento de la cavidad emite y absorbe rayos X (*flechas negras*) que convergen sobre la muestra de combustible. Los diagramas* a-c *muestran los diseños del grupo de la Universidad japonesa de Osaka; el diagrama* d *ilustra el modelo de Friedwardt Winterberg, de Nevada.*

Peligro en el Artico

El descubrimiento del agujero de ozono sobre la Antártida aportó una prueba contundente de la vulnerabilidad de la capa de ozono estratosférica, que protege a los organismos vivos de la radiación solar ultravioleta. ¿Se repite ese fenómeno en el Artico? Los resultados provisionales a que ha llegado una expedición que ha examinado la estratosfera de esa región durante los meses de enero y febrero de este año señalan que, de momento, no. Pero se le han visto las orejas al lobo: la presencia de la química del cloro. De acuerdo con los científicos expedicionarios, las condiciones que concurren en la atmósfera ártica pueden deteriorar su capa de ozono.

Desde 1970, la capa de ozono invernal de las latitudes septentrionales ha

disminuido un 6 por ciento, cifra que triplica de lejos las previsiones de los cálculos admitidos. La expedición se había organizado para determinar la presencia, en el Artico, de cantidades importantes de los compuestos de cloro que promueven la formación del agujero antártico. Estos compuestos de cloro proceden, en su mayoría, de la rotura de los halocarburos, productos sintéticos de amplio uso refrigerante y disolvente. Integraban la expedición científicos estadounidenses de la NASA y la NOAA, noruegos, británicos, soviéticos y alemanes occidentales.

Contaron con dos aviones de investigación, especialmente equipados para esta misión, que realizaron un total de 28 vuelos al norte de Stavanger, en Noruega, durante un período de seis semanas. Los dos aviones, un DC-8 y un avión espía ER-2, acondicionado para estos fines, portaban una batería amplia de instrumentos analíticos.

En el Antártico, las reacciones químicas que incrementan las concentraciones de monóxido y dióxido de cloro se producen en diminutas partículas que componen las nubes estratosféricas polares; aquellas substancias activas destruyen el ozono, lo que acontece cuando la luz solar, terminado el invierno polar, ilumina las capas altas de la atmósfera. Las nubes estratosféricas polares abundan menos en el polo Norte, por ser la atmósfera ártica más cálida que la antártica. A pesar de ello, Adrian F. Tuck, de la NOAA, corrobora la sorpresa que se llevaron los expedicionarios al descubrir concentraciones de monóxido y dióxido de cloro 50 veces por encima de lo normal en diversas altitudes. Los compuestos de nitrógeno, que inhiben la destrucción de ozono, se estaban agotando.

Estas condiciones se parecen a las que se dan en la atmósfera antártida. Aunque los primeros resultados no mostraban una pérdida real de ozono, Robert T. Watson, de la NASA, aseguró que podría ocurrir si las condiciones dinámicas específicas del Artico, el mantenimiento del vórtice polar, persistían durante la primavera, cuando el sol empieza a iluminar las capas altas de la atmósfera.

Estos resultados reforzarán el protocolo de Montreal, que entrará en vigor este año y que prevé una regulación de las emisiones de halocarburos, en 1998, de un 50 por ciento. El protocolo se halla sujeto a revisión de acuerdo con los nuevos datos que aporten los científicos. Watson añade que la capacidad potencial de destrucción de la capa de ozono en el Artico es muy fuerte y que con el protocolo actual la concentración de cloro en la estratosfera se doblará.

Cuásares y radiogalaxias: ¿dos de lo mismo?

En su morfología, cuásares y radiogalaxias difieren bastante. Los cuásares son estructuras muy compactas que emiten cantidades ingentes de luz y de energía radioeléctrica. Las radiogalaxias son objetos cósmicos cuyos extremos tienen mayor sección que su centro; emiten, sobre todo, en la zona de las ondas de radio y superan en tamaño las galaxias comunes. Ahora bien, un análisis más profundo pone de manifiesto algunas relaciones entre ambas estructuras. Los cuásares parecen hallarse embutidos en galaxias elípticas brillantes, como las que se observan en el centro de la mayoría de las radiogalaxias; y la energía radioeléctrica procedente de los cuásares remeda la de una radiogalaxia truncada.

Estos fenómenos han inducido a Peter Barthel, de la Universidad holandesa de Groningen, a proponer la hipótesis según la cual cuásares y radiogalaxias constituirían el mismo objeto cósmico visto desde diferentes perspectivas. Su modelo, que describe en un artículo en la revista *Astrophysical Journal*, está tejido con retazos de otras teorías. Se basa en la presencia, en el centro de la galaxia brillante, de un "centro de energía" en rotación, probablemente un agujero negro cuya masa multiplicaría millones de veces la solar. Según Barthel, podría haber, en torno al ecuador del agujero negro, un grueso toro de polvo; de cada polo del agujero emergirían haces de partículas cargadas, hasta culminar en dos enormes nubes radioluminosas más allá del perímetro de la galaxia principal.

Para Barthel, la orientación del toro de polvo resulta decisiva. Si está situado perpendicular a la línea de observación desde la Tierra, el toro sirve de marco al brillante remolino de estrellas que se precipitan hacia el agujero negro. Por tratarse de una región bastante restringida, eclipsa el resto de la galaxia y el observador distingue sólo un punto de luz: un cuásar. La radiogalaxia, que está alineada con el eje del toro y, por tanto, con la línea de observación desde la Tierra, aparece en escorzo; sólo se deja ver la mitad más próxima a la Tierra. Si el toro está alineado, o inclinado un ángulo menor o igual a 45 grados respecto la línea de observación desde la Tierra, bloquea la luz procedente del "centro de energía". En estas condiciones el observador detecta una radiogalaxia.

Con esta teoría se recompone el rompecabezas astronómico que inquietaba a los científicos: ¿por qué había tantos cuásares que parecían emitir materia a velocidad superlumínica (por encima de la velocidad de la luz)? Goza de aceptación entre los físicos la idea según la cual resulta imposible acelerar materia a velocidades superlumínicas; ello no obstante, se ha caracterizado teóricamente un efecto relacionado con la relatividad especial, que puede producir la ilusión de movimiento superlumínico en la hipótesis de que la materia emitida por el cuásar avanzara casi directamente hacia el observador. Otros científicos, sin desdeñar el modelo de Barthel, insisten en la necesidad de obtener una mejor confirmación experimental.

Arqueoastronomía irlandesa

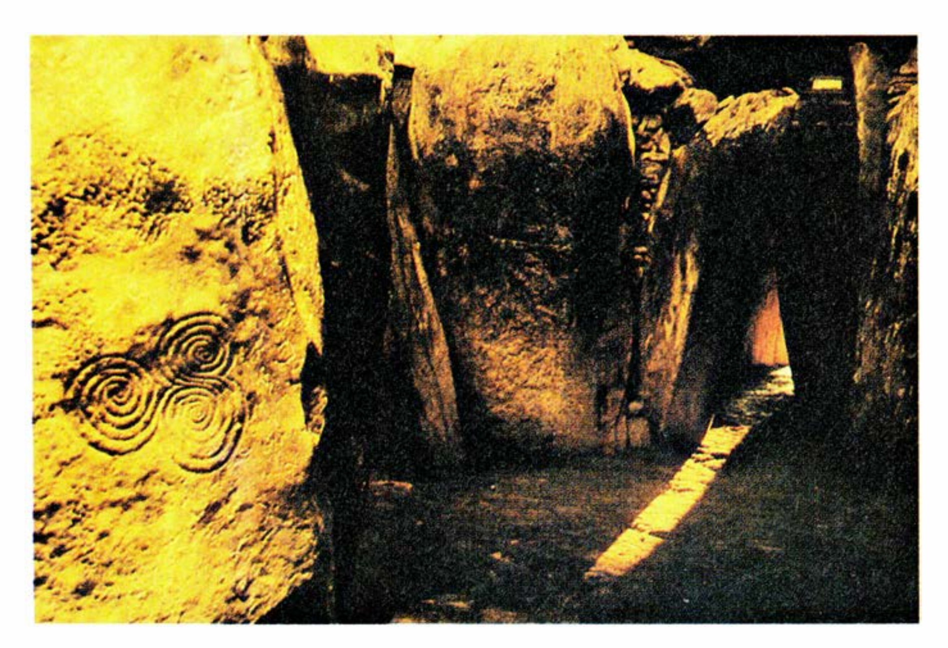
¿Nació en Irlanda la astrofísica? Un estudio reciente sobre la tumba de Newgrange, situada en un valle que dista unos 50 kilómetros de Dublín, en dirección noroeste, así lo sugiere. La estancia consta de un pasillo de poco más de 18 metros de longitud, formado por grandes rocas, tapadas por un amasijo de tierra y guijarros, y de la cámara principal, con tres estancias menores. La datación de una muestra de carbón vegetal encontrada allí nos revela que se construyó hace unos 5100 años, o, lo que es lo mismo, precedió en tres siglos a Stonehenge, considerado el monumento más antiguo alineado con la dinámica celeste.

Cuenta una leyenda local que, en un momento determinado del año, la luz del sol penetraba en la tumba e iluminaba unas incisiones de la pared de una de las cámaras. Aunque descubierta en 1699, la tumba no se excavó con rigor arqueológico hasta los años sesenta de nuestro siglo, cuando se descubrió una abertura entre la primera y la segunda losa, a través de la cual a mediados de invierno la luz del sol llegaba ocasionalmente hasta la cámara. Los investigadores no podían confirmar, sin embargo, que el alineamiento había sido deliberado.

Hace unos 18 meses, Tom P. Ray, del Instituto de Estudios Avanzados de Dublín, decidió estudiar el problema. Descubrió que el sol penetraba en la cámara unas dos semanas de invierno, y sólo durante unos breves instantes por la mañana. El periodo de tiempo más dilatado en que el sol ilumina la estancia, unos 12 minutos, se produce el día más corto del año, el solsticio de invierno. A los cuatro minutos y medio de la salida del sol, un haz de luz penetra por una suerte de ventana construida por encima de la entrada, atraviesa el estrecho pasillo y se inclina a medio camino en el suelo de la majestuosa cámara.

Teniendo en cuenta la variación periódica del eje terrestre con respecto al sol, Ray ha comprobado que hace 5100 años el efecto revistía mayor espectacularidad. En el solsticio de invierno, un rayo de luz entraba en la habitación exactamente a la salida del sol y se adentraba profundamente en el interior de la habitación. Ray señala que el rayo de luz iluminaba indirectamente un grabado de la pared posterior de la cámara, tal como dice la leyenda.

La probabilidad de que todo esto haya ocurrido por casualidad es, según la opinión de Ray, astronómicamente muy pequeña. Sugiere también que los campesinos de la edad de piedra, guiados por el ritmo de las estaciones, construirían la tumba. Persisten muchos interrogantes sobre el pasado de la misma: ¿Cómo se construyó? ¿Con qué fines? ¿Cómo ha podido llegar hasta nuestros días la leyenda en que se explica su secreto?



INCISION de la pared de la estancia central de la tumba irlandesa que podría ser el primer monumento astronómico jamás descubierto. Recibía iluminación solar indirecta al romper el día del solsticio de invierno. Fotografía cedida por Conn Brogan, Office of Public Works, Dublín.

Victoria del microprocesador sobre el cerebro

Se veía venir. Los mejores jugadores de ajedrez empiezan a sucumbir en su partida contra los ordenadores.

Pensábase, no hace mucho, que las máquinas en liza eran ingenios carentes de imaginación y chispa, capaces de ganar sólo a jugadores mediocres. Pero el aldabonazo se dio ya en septiembre: Hitech, un ordenador construido en la Universidad Carnegie-Mellon, venció a Arnold Denker, excampeón de los Estados Unidos, en una partida de exibición, consiguiendo así la primera victoria de la máquina sobre un gran maestro.

Dos meses después, otro computador diseñado por un nuevo grupo de la misma universidad eclipsó la hazaña de Hitech. *Deep Thought* ("pensamiento profundo"), que así se llama el héroe, participó en un torneo donde competían algunos de los mejores ajedrecistas del mundo. El ordenador venció a Bent Larsen, gran maestro y uno de los 50 mejores jugadores. Durante la celebración del torneo, *Deep Thought* consiguió suficientes puntos como para alcanzar la categoría de maestro internacional.

Con el entorchado se ha llevado también los 10.000 dólares del premio creado hace nueve años por el experto en computadores Edward Fredkin. Los padres de *Deep*, cuatro licenciados y un recién doctorado, no piensan dormirse en los laureles y ya están trabajando para ganar los 100.000 dólares, que Fredkin ha prometido al computador que venza al jugador número 1 del mundo. Aumentarán de dos a ocho los microprocesadores comerciales con que *Deep Thought* analiza los movimientos. Algunos expertos consideran que esta mayor capacidad puede permitir que el ordenador, tras unos cuantos años de práctica, sea el mejor ajedrecista del mundo.

Ciencia y empresa

La CEE: ¿Una alianza para el progreso?

La voz de convocatoria en muchos países europeos es, en estos días, "1992". En ese año desaparecerán las barreras comerciales entre los países europeos, dejando en libertad un mercado único de 320 millones de consumidores que abarcará los doce países de la Comunidad Económica Europea (CEE). Las compañías competirán, sin privilegios nacionales, en todo el mercado común. En particular, las empresas europeas de alta tecnología esperan adquirir suficiente potencia para competir con las mejores del Japón y los Estados Unidos.

Así se confía que suceda. Desde la óptica de los fabricantes de alta tecnología, la construcción de un mercado único constituye, sin embargo, un proceso laborioso. Walter Gründsteidl, alto ejecutivo de Phillips, ve en 1992 "un símbolo, un importante paso adelante. Pero algo más complejo que darle al interruptor". La carencia de una estructura sólida de la industria europea de las telecomunicaciones ejemplifica cuán duro será el camino hasta 1992. "Nadie puede afirmar que las telecomunicaciones europeas ofrezcan un panorama de perfiles claros", reconoce Gerhard Zeidler, director general de Standard Elektrik Lorenz.

Estamos hablando del sector industrial que se presume máximo beneficiario del mercado unificado. En 1987, la Comisión de las Comunidades Europeas (organismo que, en 1985, echó las bases de la unificación), publicó un libro blanco sobre la industria. Se anotaba allí que, si bien ningún país europeo representaba en solitario más del 6 por ciento del mercado mundial de telecomunicaciones, la CEE en conjunto suponía el 20 por ciento. Estados Unidos domina el 35 por ciento del mercado y Japón el 11 por ciento.

Desde hace tiempo, Europa desea remodelar su fragmentario mercado y transformarlo en otro en que los fabricantes logren sustanciales economías de escala. El Tratado de Roma, que marcó los primeros esfuerzos de unificación de la CEE, se firmó en 1957, pero hasta hace cuatro años sus doce signatarios sólo habían tomado medidas preliminares hacia un mercado único. (Los países que integran la CEE son: Alemania Federal, Bélgica, Dinamarca, España, Francia, Grecia, Holanda, Irlanda, Italia, Luxemburgo, Portugal y el Reino Unido.)

Cada nación siguió su propia política en el sector de las telecomunicaciones. Aun cuando había organismos internacionales de normalización, el ente administrativo que entendía de "correos, telégrafos y teléfonos" de cada país establecía las normas y protocolos locales, definía los servicios mínimos a suministrar y adquiría la mayor parte del equipo, desde sistemas de conmutación hasta aparatos auriculares. Por culpa de esa fragmentación, los sistemas de conmutación dirigían las llamadas telefónicas de una parte de Europa a otra con lentitud y dificultad en el mejor de los casos. En el peor, se creaban sistemas incompatibles. Los teléfonos móviles, por ejemplo, sólo se podían usar dentro del ámbito de una red nacional o local específica.

"Europa se acantonó" durante el decenio de 1970, observa Margaret Sharp, de la Universidad de Sussex. En telecomunicaciones y otras industrias, un organismo gubernamental compraba su equipo a un proveedor interior, apoyando así una "empresa líder nacional", una compañía privilegiada y protegida con independencia de sus fallos y limitaciones. "En Gran Bretaña producíamos nuestro propio sistema de conmutación digital, que llevaba cinco años de retraso con respecto a los producidos para exportación. Eso ya no volverá a suceder", comenta John A. Kay, de la Escuela de Altos Estudios Empresariales de Londres.

Para beneficiarse de los ahorros de escala que el mercado único posibilitará, el fabricante debe poder vender el mismo producto en toda la CEE. Traducido eso al equipo del usuario, los aparatos telefónicos por ejemplo, significa agilizar las normas de cada país de suerte que den cabida a las de los demás, señala Josef Kestens, secretario general adjunto de CENELEC, organismo de normalización europeo en el ámbito de la electrotecnología. Pero las normas para productos complejos, piénsese en los conmutadores de una central, no se pueden adaptar de la noche a la mañana. Según un informe del Instituto Europeo de Administración de Empresas (INSEAD), los fabricantes de centrales telefónicas comenzarán a beneficiarse de las economías de escala cuando una nueva generación tecnológica barra la actual.

De ahí que la CEE preste especial atención a la avanzadilla de las tecnologías de comunicaciones: satélites y Red Digital de Servicios Integrados (ISDN). Al posibilitar la transmisión rápida de voz, datos y señales visuales por una misma línea, el ISDN fomentará la aparición de nuevos servicios: correo oral y electrónico, facsímiles en color y televisión de alta definición. Para acelerar la elaboración de normas para las telecomunicaciones, la CEE acaba de crear un nuevo instituto de normalización y certificación.

La comisión habrá de abordar el problema, políticamente espinoso, de cómo normalizar las adquisiciones de los CTT. En la actualidad, el 10 por ciento de los contratos de telecomunicaciones públicas están abiertos a licitación para compañías extranjeras. Ensanchar ese margen hasta el 100 por cien, uno de los objetivos de la comisión, puede significar inicialmente el cierre de algunas fábricas y mayor desempleo en ciertas zonas. Sin olvidar que los propios CTT son, en sí mismos, importantes creadores de empleo que dan tra-

bajo a casi un millón de personas en la CEE. (Pese a ello, la comisión predice un aumento neto del empleo debido, en parte, a la creación de nuevos servicios ISDN.)

Mientras se preparan para ese mercado común, muchas compañías buscan socios o consorcios para compartir los gastos de investigación. Aunque ciertos consorcios existentes, recordaremos el programa de investigación y desarrollo en tecnología avanzada de comunicaciones para Europa (RACE), se ciñen a la investigación básica o "precompetitiva", las empresas se mueven para compartir también los costes de desarrollo.

La fusión con compañías de otros países se está convirtiendo en camino usual para establecerse mejor en otros mercados nacionales, así como para aumentar los recursos internos de la compañía. El año pasado, Alcatel, compañía francesa de telecomunicaciones se asoció con la división europea de telecomunicaciones de la ITT. (Alcatel posee también la empresa Standard Elektrik Lorenz y la española Alcatel Standard.) Ericsson, empresa sueca, ha comprado un paquete de la compañía telefónica nacional francesa. Los conglomerados electrónicos británicos GEC y Plessey han fusionado su respectiva división de telecomunicaciones para erigir una empresa común llamada GPT. La alemana Siemens se halla interesada por entrar en GPT.

Siemens y GEC han tanteado la compra de Plessey. Los negocios de Plessey abarcan desde electrónica militar hasta semiconductores y aparatos médicos pasando por telecomunicaciones; es, sin embargo, en el último sector donde se esperan mayores beneficios. Con el consorcio Siemens-GEC-Plessey, compitiendo en un mercado abierto, Europa puede alcanzar el éxito económico disfrutado en buena parte por los Estados Unidos y Japón.

Para que 1992 colme las esperanzas cifradas en él, habrá que resolver antes una enmarañada red de problemas financieros, monetarios y sociales. ¿Se creará un banco central europeo? ¿Cómo armonizar los distintos criterios de seguridad? Las fusiones entran en vías tortuosas en cuanto los objetivos económicos colisionan con los intereses de la seguridad nacional. A modo de ejemplo: pese a la ganancia presumible del sector de telecomunicaciones con la asociación Siemens-GEC-Plessey, el Ministerio de Defensa del Reino Unido se opuso a la operación en febrero, por un conflicto verosímil con la intendencia militar británica.

Al margen de los obstáculos que encuentra el mercado común, la confianza en el mismo ha adquirido predicamento en Europa: gracias a la unificación, el producto nacional bruto agregado debería subir entre 4,5 y 7 por ciento, los precios bajar entre 4,5 y 6 por ciento y crearse de dos a cinco millones de puestos de trabajo.

El peso de las pruebas

Antes de que una unidad de sangre llegue a un paciente, ha de someterse a distintas pruebas que permitan descartar la presencia de enfermedades infecciosas. A medida que la lista de pruebas crece y los costes se encarecen, los bancos de sangre empiezan a preguntarse si vale la pena investigar en la sangre todas las raras enfermedades que puede transportar. Además, para las compañías que fabrican los equipos de pruebas, las orientaciones periódicas que los bancos de sangre establecen pueden afectar la dirección de las investigaciones y el planeamiento de la producción.

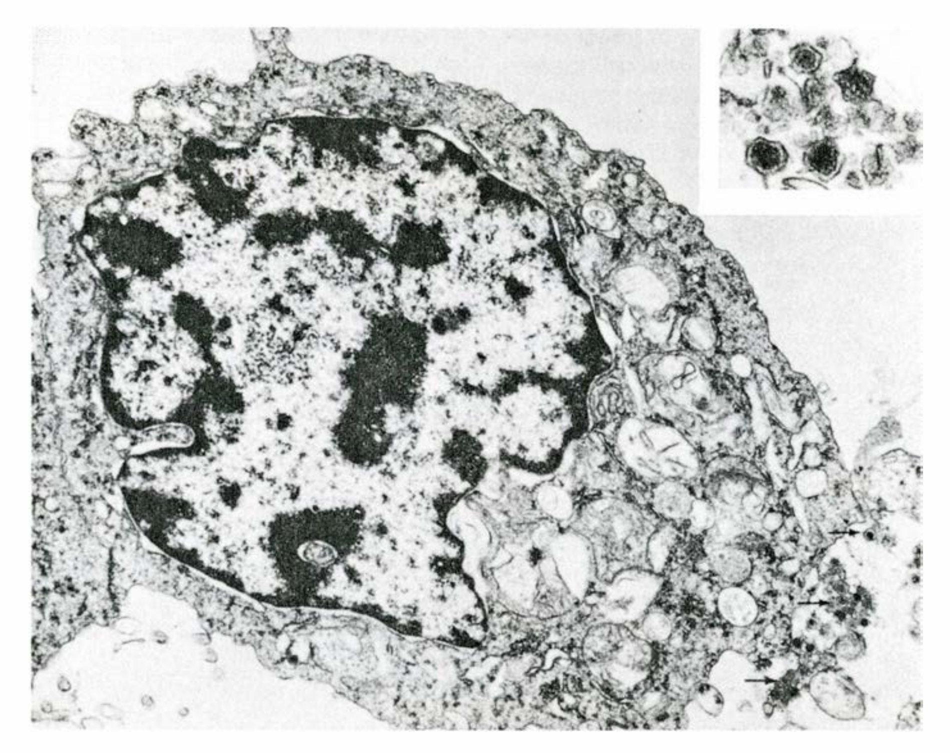
A principios de año, varios bancos de sangre comenzaron la prueba del virus linfotrópico de la célula *T* humana, o HTLV-I, raro retrovirus asociado a la leucemia de células *T* y a la paraparesis espástica tropical, que produce parálisis. Esta decisión eleva a cinco el número de enfermedades infecciosas que deben comprobarse en la sangre; las restantes son: sífilis, hepatitis B, SIDA y hepatitis no-A no-B.)

El HTLV-I goza de amplia difusión en ciertas zonas del Japón, el Caribe y Africa. Y, si no hubiera control, el uno por mil de los pacientes que reciben transfusiones de sangre quedarían infectados. Además, como el HTLV-I tiene un periodo latente de hasta 30 años, podría difundirse si no se corta su presencia desde el principio.

Para los fabricantes, la producción de cajas para probar los más de 12 millones de unidades recogidos cada año sólo en los Estados Unidos constituye un negocio pingüe. Du Pont y Cellular Products fabrican materiales de prueba para el virus.

Pero a muchos investigadores les precupa el coste anejo a las nuevas pruebas para enfermedades infecciosas que se descubran. A las pruebas obligadas, habrá que sumar en un futuro inmediato otras: la hepatitis no-A no-B y una prueba de antígeno HIV destinada a encontrar muestras de sangre infectadas con HIV pero que no contenga anticuerpos del virus. Es probable, además, que el conjunto de enfermedades transmitidas por las transfusiones de sangre crezca igualmente. Sólo es cuestión de tiempo.

¿En qué estriba el encarecimiento?



*LEUCOCITO SANGUINEO expulsando partículas del virus HTLV-I (*parte inferior derecha*); las partículas se aprecian mejor, ampliadas, en el recuadro. Las fotografías son cortesía de Bernard J. Poiesz, de la facultad de medicina de la Universidad estatal de Nueva York en Syracuse.*

Tomemos de ejemplo el caso norteamericano. La mayoría de los funcionarios de la Cruz Roja de ese país estiman que cada prueba cuesta unos 5 dólares por acto y muestra de sangre, es decir, de 50 a 75 millones de dólares cada año. Y se crea una dificultad más crítica: la adición de pruebas reduce la provisión de sangre sana, al aumentar el número de resultados "falsamente positivos". Aunque la Cruz Roja estima que menos de un uno por ciento de los donantes de sangre están infectados con hepatitis no-A no-B, entre el 5 y el 6 por ciento de los donantes no pasan la prueba o dan resultados dudosos. Aunque las pruebas mejorasen, todo lo que añada complicación al trabajo realizado por los ayudantes de laboratorio de los bancos de sangre contribuirá a incrementar la posibilidad de errores.

¿Qué soluciones prevén los laboratorios? Sigamos con el ejemplo norteamericano. Cellular Products, que se dedica a pruebas de diagnóstico, está esperando el resultado de una revisión, por parte de la Oficina de Patentes y Certificación, sobre una combinación de las pruebas HIV y HTLV-I que ayudaría a simplificar la tarea de cribado; Du Pont ha comprado ya los derechos para comercializar la prueba. Du Pont también e investigadores subvencionados por el Instituto Nacional del Corazón, Pulmones y Sangre están explorando los medios de inactivar cierto número de virus sin dañar la sangre. Abbott está investigando la forma de automatizar los métodos de análisis. Otros investigadores esperan que los factores del crecimiento, tales como la eritropoyetina, pudieran aumentar la producción de glóbulos rojos en algunos pacientes y eliminar la necesidad de transfusiones.

Sobre alas de gasa

Cistóbal Colón lo hubiera entendido: nueva tecnología, un viaje épico y búsqueda de subvenciones financieras. Bienvenido sea 1992, un año "mágico" por muchas razones, no siendo la última el celebrarse el quinto centenario del Descubrimiento. ¿Qué mejor manera de conmemorarlo que financiando una empresa tan atrevida como la del mismo Colón? El empresario Klaus P. Heiss ha aportado su dinero a la regata solar. Aunque lejos todavía de la realidad, la tecnología de la navegación solar no es tan utópica como parece. Hasta donde llegan nuestros conocimientos, una vela solar es un vehículo espacial, enorme y ligero, construido con mylar o kapton metalizados, más parecido a una cometa plateada que a un galeón español. Lo mismo que la vela tradicional es impulsada por el viento, la solar es impulsada por los fotones luminosos a través del vacío del espacio. El vehículo parte lentamente; desde una órbita alrededor del Sol, una vela que mida 150.000 metros cuadrados podría acelerarse a razón de sólo 0,5 milímetros por segundo en cada segundo. A ese ritmo, la vela tardaría unas ocho horas en alcanzar la velocidad de 50 kilómetros por hora. Ahora bien, como una vela se lanzaría a más de 1000 kilómetros de la Tierra, apenas hallaría resistencia del aire e iría acelerándose sin cesar.

La regata no tripulada que propuso Heiss constaría de varias etapas. Todas las velas que llegaran recibirían premio. Habría gratificaciones especiales para la primera vela que arribara a la Luna y, con el tiempo, a Marte.

Se espera estimular, sobre todo, la participación de estudiantes, ayudándoles a financiar la construcción y costes de lanzamiento de los mejores modelos. Se pretende contar, al menos, con una vela de Europa, de donde partió Colón, otra de Asia, a donde creyó que iba, y una de las Américas, donde realmente llegó. Naves que lógicamente se bautizarían con los nombres de *Niña*, *Pinta* y *Santa María*.

Ha aparecido ya un primer aspirante. A mediados de la década de los setenta, la NASA invirtió más de ocho millones de dólares y dos años de trabajo en el proyecto de una vela que saliera al encuentro del cometa Halley. Aunque la NASA renunciaría después a la vela solar y a la misión Halley, los ingenieros del Laboratorio de Propulsión a Chorro, que habían realizado buena parte del trabajo, no se resignaban a quemar la nave. En 1979 llamaron a Robert L. Staehle, directivo del Laboratorio, que acababa de poner en marcha la Fundación Mundial del Espacio con el propósito de realizar varios proyectos espaciales. La fundación no tardó en dedicar sus esfuerzos a la construcción de una vela solar. Trabajando por las noches y los fines de semana, la abigarrada tripulación de voluntarios proyectó una vela de 900 metros cuadrados. Aunque demasiado pequeña para transportar carga útil, Staehle calcula que velas mayores podrían transportar económicamente provisiones y equipo a otros planetas.

Se están formando grupos interesados en velas solares en Canadá, Francia, India, Japón y la Unión Soviética. La regata ha atraído además la atención de otros entusiastas. El Instituto Norteamericano de Aeronáutica y Astronáutica, por ejemplo, ha consentido en juzgar el mérito técnico de los proyectos. El Club de Exploradores, una sociedad neoyorquina que cuenta con muchos astronautas entre sus miembros, podría donar la copa al ganador.

Pero, como Colón sufrió en sangre propia, atraer fondos para la empresa podría constituir el mayor obstáculo. De las empresas norteamericanas se espera recaudar 15 millones de dólares; queda por convencer a las europeas y japonesas para que demuestren su generosidad. Y como no podía ser menos, se confía en los derechos de la televisión.

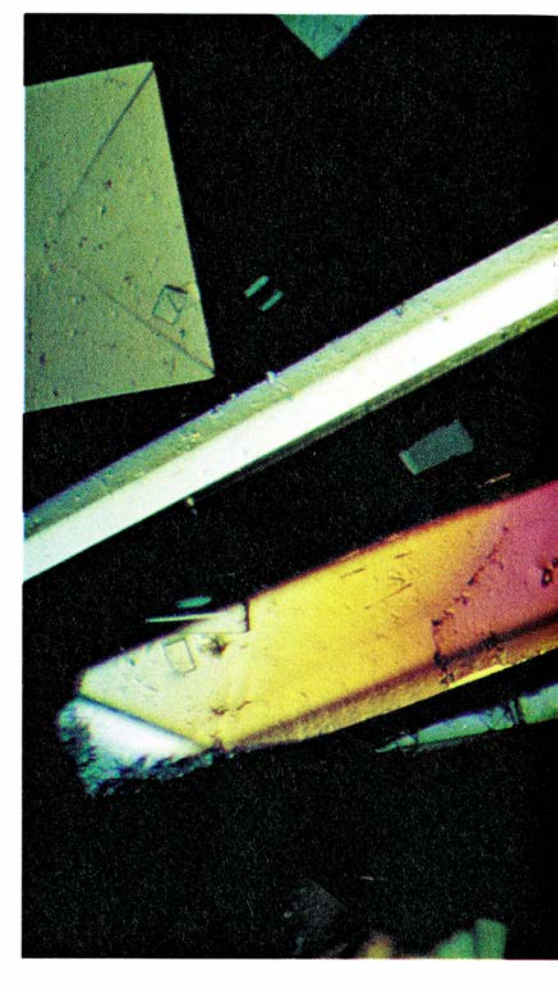


ESTE PROTOTIPO DE VELA SOLAR, hecho de mylar, podría algún día surcar el espacio impulsado por fotones. La configuración circular del centro transportaría los aparejos y útiles. La fotografía es cortesía de Robert L. Staehle, de la Fundación Mundial del Espacio.

Cristales macromoleculares

El crecimiento de los cristales encierra la clave para deducir la estructura de las macromoléculas

Alexander McPherson



Con el advenimiento de la ingeniería genética y la tecnología del ADN recombinante, bioquímicos y biólogos moleculares adquirieron un nuevo control sobre la síntesis de las moléculas que catalizan e intervienen en las reacciones químicas que se producen en los procesos vitales. Paralelamente con esta nueva capacidad de síntesis, se han venido desarrollando potentes métodos analíticos que pueden investigar macromoléculas complejas —pensemos en las proteínas y los ácidos nucleicos—, amén de otros compuestos químicos más convencionales. El método principal es el análisis por difracción de rayos X, que obtiene imágenes moleculares a partir de los diagramas formados cuando los cristales dispersan los rayos X.

La cristalografía de rayos X constituye uno de los mejores métodos para analizar el nivel atómico de la estructura molecular en tres dimensiones. Esta técnica nos faculta también para representar interacciones macromoleculares con otras moléculas. Con la cristalografía de rayos X podemos investigar, por ejemplo, qué ocurre cuando una enzima se une a una molécula del sustrato en la catalización de una reacción química o qué acontece cuando un anticuerpo forma un complejo con una molécula antigénica.

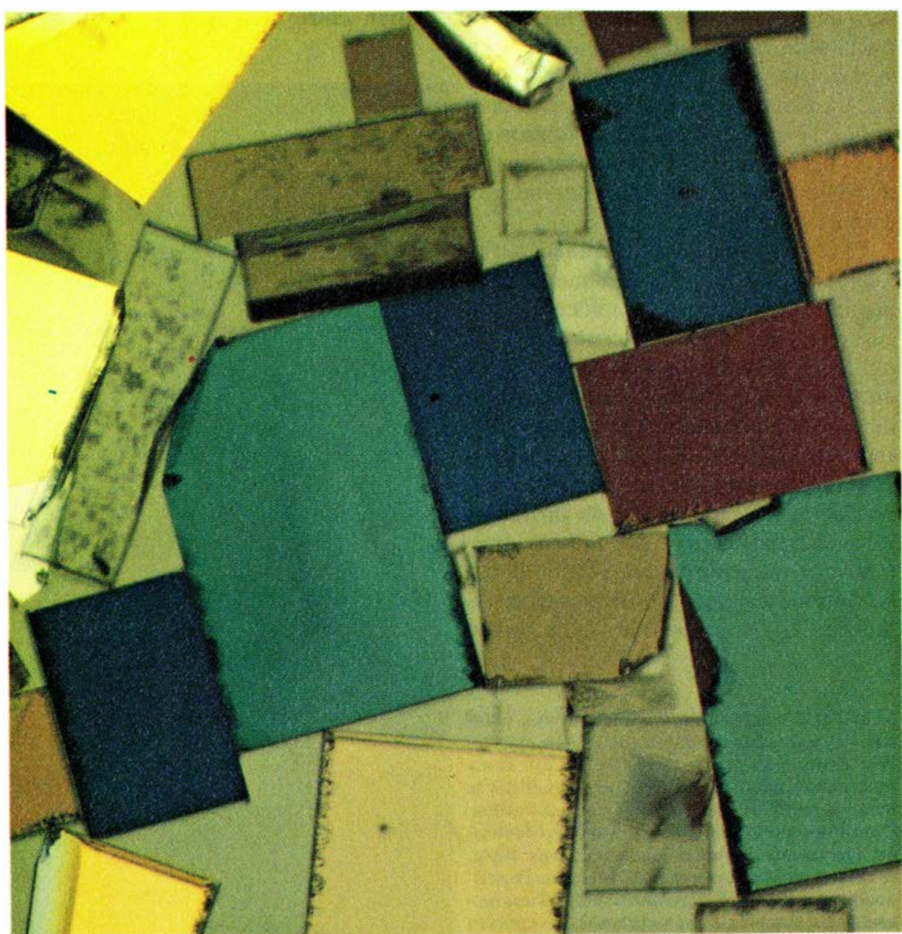
Desde que se introdujo la cristalografía de rayos X en 1913, los avances en las fuentes de dicha emisión, los dispositivos de detección y la precisión y la velocidad de cálculo han reducido drásticamente la cantidad de tiempo que se tarda en obtener una imagen cristalográfica. Las estructuras de moléculas convencionales, cuya construcción consumía varios años, se determinan hoy en un par de semanas o antes. La estructura de una macromolécula puede resolverse, refinarse y representarse en tres dimensiones en un tiempo de unos pocos meses. Si la estructura de una proteína ha quedado resuelta, los detalles de sus complejos con otras moléculas pueden determinarse frecuentemente en sólo unos días.

El factor que limita la cristalografía de rayos X no es la propia técnica, sino la disponibilidad de cristales macromoleculares, pues sólo se ha logrado cristalizar alguna vez una pequeña parte de las miles de proteínas conocidas. La mayoría de las proteínas y de los ácidos nucleicos no cristalizan fácilmente, y los cristales que se someten al análisis por difracción de rayos X deben ser casi impecables. Por tanto, los bioquímicos se han visto obligados a limitar sus estudios a las moléculas que lograban cristalizar, enzimas como la lisozima de los huevos de gallina, la pepsina de los jugos gástricos y la hemoglobina de la sangre.

Aunque el crecimiento de los primeros cristales de proteínas se consiguió hace más de un siglo, el proceso implicado permaneció desconocido durante mucho tiempo. Antes de la invención de la difracción de rayos X, el desarrollo de cristales (que tiene lugar con la exclusión de contaminantes) sirvió para demostrar la pureza de una preparación. Esta práctica se consideraba más un arte que una ciencia. Ni siquiera hoy abundan las personas expertas en los procedimientos y los métodos de crecimiento de cristales macromoleculares; además, sólo se cuenta con unos pocos métodos empíricos.

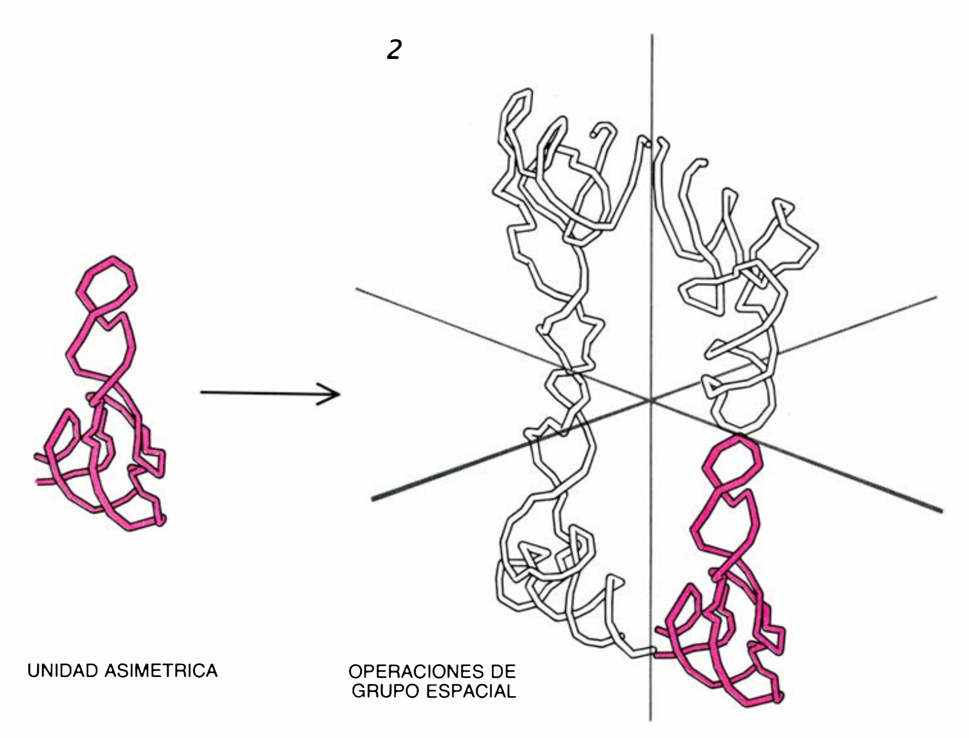
El fracaso en la obtención de cristales de algunas proteínas y ácidos nucleicos para su representación dificulta la comprensión básica de las interacciones macromoleculares naturales. Nos hallamos ante una situación que frustra también los esfuerzos aplicados de la industria de la biotecnología. El futuro y el alcance de esta industria es asombroso al estar equipada con las herramientas para modificar las moléculas originales y crear otras nuevas. La capacidad de obtener un espectro más amplio de imágenes macromoleculares beneficiaría enormemente a las aplicaciones industriales. Podrían lograrse enzimas utilizadas en repostería, fermentación y tratamiento de comestibles para alterar la solubilidad, la estabilidad calorífica o la tolerancia ácida, si lográramos identificar sus partes críticas; y también se podría mejorar el

ALEXANDER McPHERSON, director del departamento de bioquímica en la Universidad de California en Riverside, fundó Cryschem, Inc., una compañía de biotecnología especializada en la cristalización y el análisis estructural de las proteínas. Su interés en la estructura de las macromoléculas se remonta a su tesis de capacitación en la Universidad de Purdue, donde ayudó a resolver la estructura de la enzima lactato-deshidrogenasa. Después de doctorarse en dicho centro en 1970, ingresó en un equipo de investigación del Instituto Tecnológico de Massachusetts que definió la estructura del ARN de transferencia, un ácido nucleico. McPherson ha escrito un libro sobre cristales de proteínas, amén de organizar dos conferencias internacionales sobre el crecimiento de los cristales macromoleculares.



1. PROTEINAS VEGETALES: concanavalina B (*arriba*) y vicilina (*derecha*); las ofrecemos porque las dos se encuentran entre las pocas proteínas que forman cristales fácilmente. Los cristales están vistos bajo luz polarizada para revelar cualquier heterogeneidad (''inhomogeneidad'') que induciría a error en un análisis por rayos X. Los cristales de proteínas y ácidos nucleicos, como el ADN, se desarrollan con mucha mayor dificultad que los cristales de compuestos simples como la sal de mesa. Las macromoléculas, sin embargo, deben cristalizarse para que puedan abordarse con cristalografía de rayos X, uno de los métodos más potentes de los que se dispone para resolver la estructura molecular.

2. ESTRUCTURA CRISTALINA entendida como una distribución única de una unidad asimétrica (*1*), representada en este caso por el ARN de transferencia, un ácido nucleico. Varias unidades asimétricas están dispuestas en una configuración simétrica definida por un conjunto de operaciones geométricas a las que se conoce como grupo espacial (*2*). La disposición de las moléculas especificada por el grupo espacial puede encerrarse en un recipiente imaginario de volumen mínimo llamado celdilla unidad (*3*). La repetición de esta unidad en intervalos regulares crea un cristal (*4*).



valor nutritivo de los cereales y de las judías, así como la resistencia de las cosechas agrícolas a las plagas y a las duras condiciones ambientales. Los fármacos que interaccionan con las proteínas y los ácidos nucleicos se podrían diseñar racional y sistemáticamente si alcanzáramos a representar con nitidez las interacciones entre un fármaco y la molécula a la que ataca.

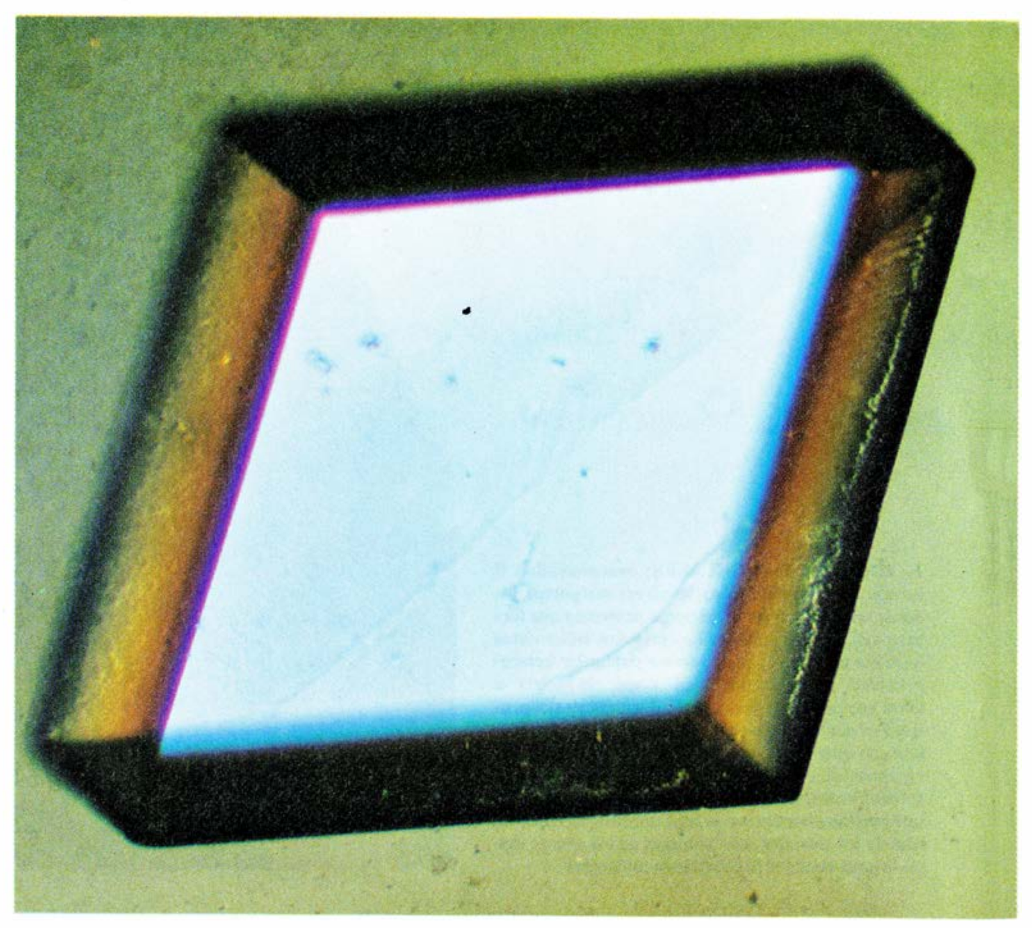
La clave para concretar el porvenir de la biotecnología está en el desarrollo de nuevas técnicas fiables que permitan obtener cristales adecuados de proteínas y ácidos nucleicos para la cristalografía de rayos X. Si se quiere explotar esta técnica al máximo, deberá prestarse atención a los principios físicos y químicos de la cristalización macromolecular.

Cualquier tipo de cristales, ya sean de sal de mesa o de la más complicada de las proteínas, se ordena en sucesiones de moléculas caracterizadas por un juego de parámetros. Estos describen la distribución de los átomos en una "celdilla unidad" que se repite y la disposición de las celdillas unidad que componen el cristal.

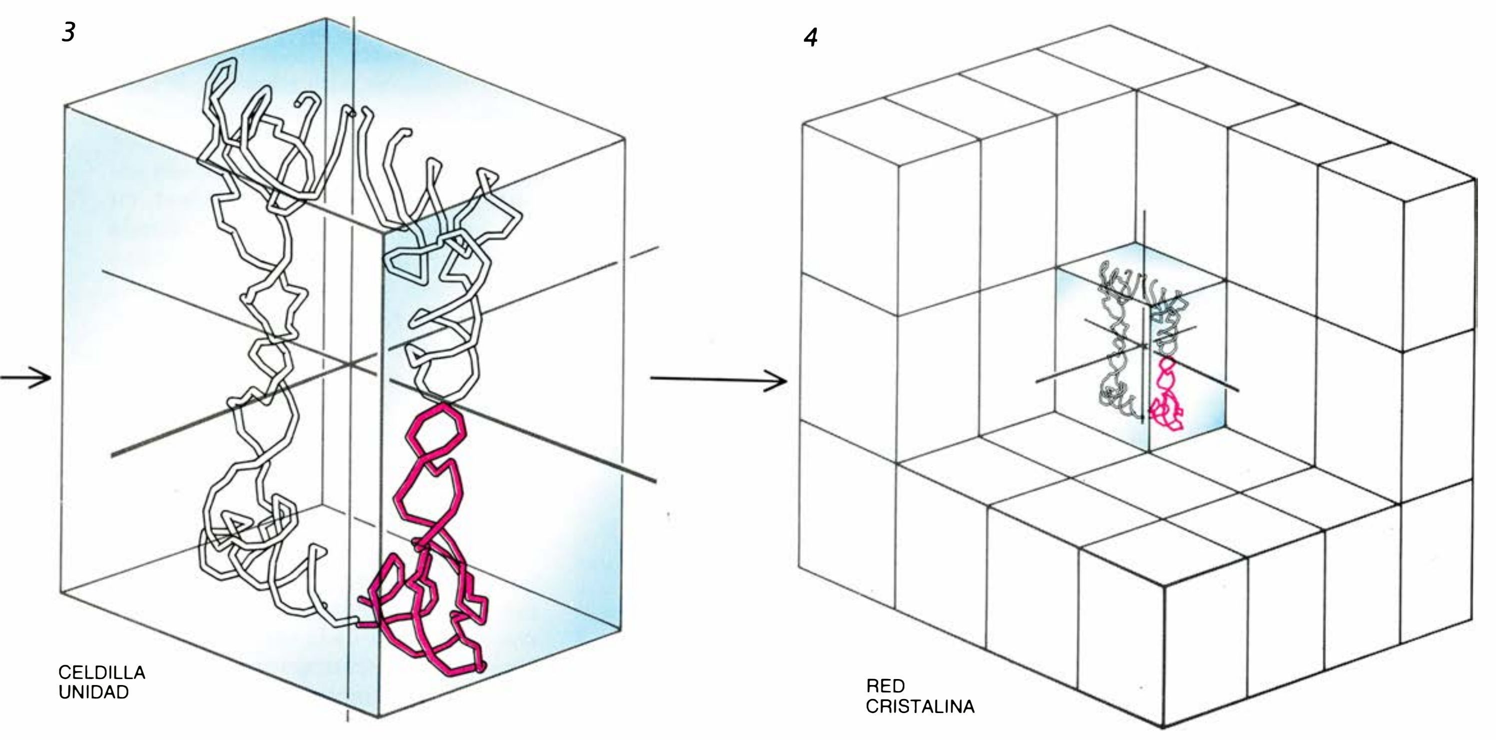
El componente fundamental del cristal, denominado unidad asimétrica, es normalmente una sola molécula de la sustancia que forma el cristal. Varias unidades asimétricas se agrupan juntas en una configuración simétrica cuya descripción matemática se llama grupo espacial. Existen 230 posibles grupos espaciales permitidos en un cristal; sin embargo, en los cristales de proteínas sólo se permiten 65, porque los aminoácidos que componen estas moléculas imponen algunas restricciones de simetría. Un tipo de molécula puede adoptar frecuentemente varias disposiciones simétricas diferentes, descritas por diversos grupos espaciales.

La celdilla unidad es una caja imaginaria de volumen mínimo que engloba el conjunto de unidades asimétricas definidas por el grupo espacial. Las celdillas unitarias tienen seis formas posibles, las longitudes de cuyas aristas varían entre 50 y 150 $\times 10^{-9}$ metros para la mayoría de los cristales de proteínas. La estructura cristalina puede representarse como una repetición de la celdilla unidad en intervalos periódicos o regulares.

En principio podría parecer que la autocolocación espontánea de moléculas en una red ordenada vulnera la segunda ley de la termodinámica que afirma que toda la materia tiende hacia

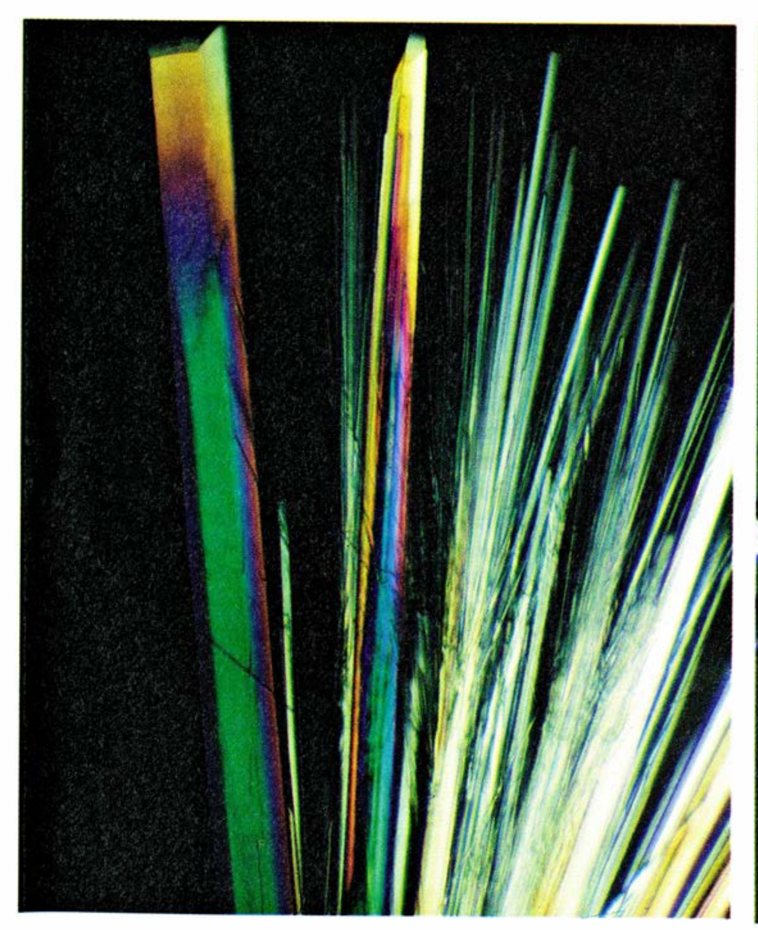


3. MORFOLOGIAS TIPICAS de cristales, vistas bajo luz polarizada a través de un microscopio óptico; incluyen un prisma romboédrico cuya arista mide más de un milímetro (*izquierda*). El cristal se formó a partir de la proteína vegetal canavalina. Cuando estos cristales se desarrollan bajo condiciones ligeramente diferentes de acidez y temperatura, se obtiene un abanico de varillas con forma de prisma hexagonal (*centro*). Las denominadas placas monoclínicas, más planas que los prismas, son también corrientes; las placas de la figura de la derecha crecieron a partir de una enzima de moho de fruta.

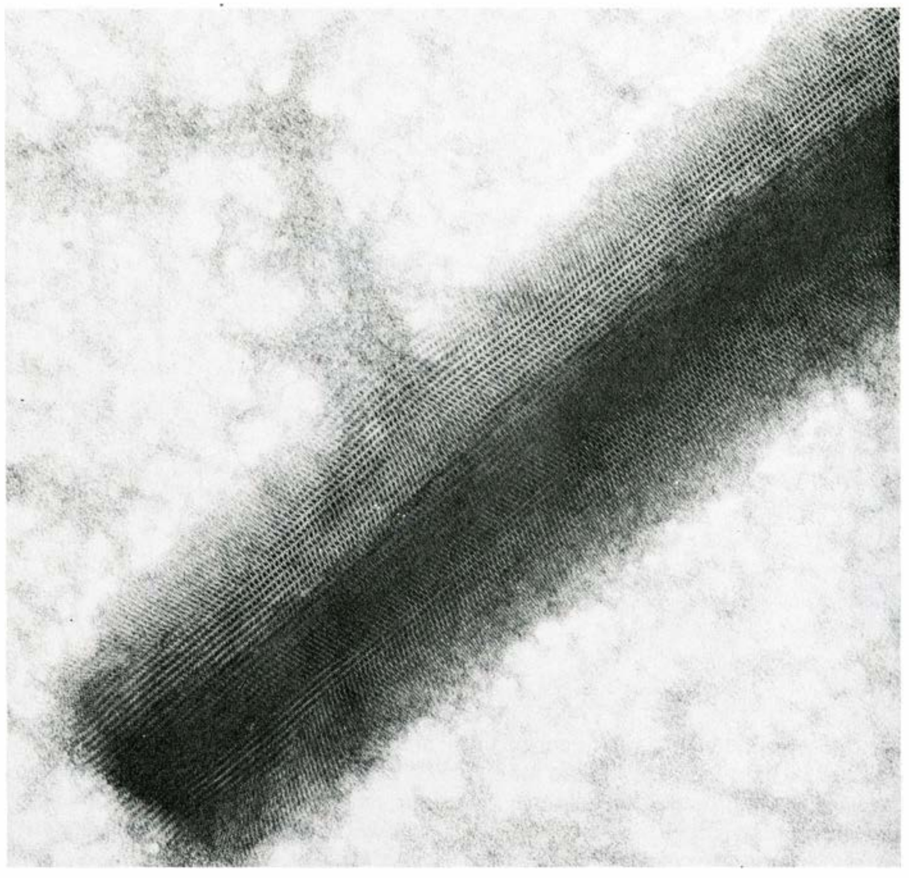


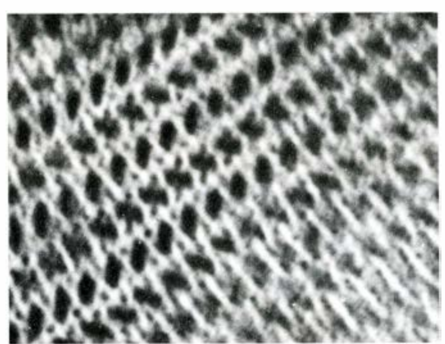
un estado de máxima entropía o desorden. Lo que ocurre es que la formación de enlaces químicos estables que acompaña a la cristalización impulsa el proceso: la liberación de energía producida en la formación del enlace compensa el orden impuesto en el sistema por la cristalización. Se puede demostrar por argumentos matemáticos y geométricos, y también es intuitivamente satisfactorio, que la máxima energía en el estado sólido se libera cuando los enlaces se forman de manera simétrica y periódicamente repetitiva.

Es obvio que el crecimiento del cristal no resulta favorable, desde una óptica energética, en todas las circunstancias. La cristalización se presenta sólo cuando se maximizan las interacciones atractivas entre las moléculas y se minimizan las interacciones repulsivas. En la práctica estas condiciones se aplican en las denominadas disoluciones supersaturadas, o extremadamente concentradas, en las que no hay suficiente agua para mantener la hidratación o apantallar por entero unas moléculas de otras. Tomando uno de los ejemplos más sencillos, la sal marina cristaliza en las charcas formadas por la

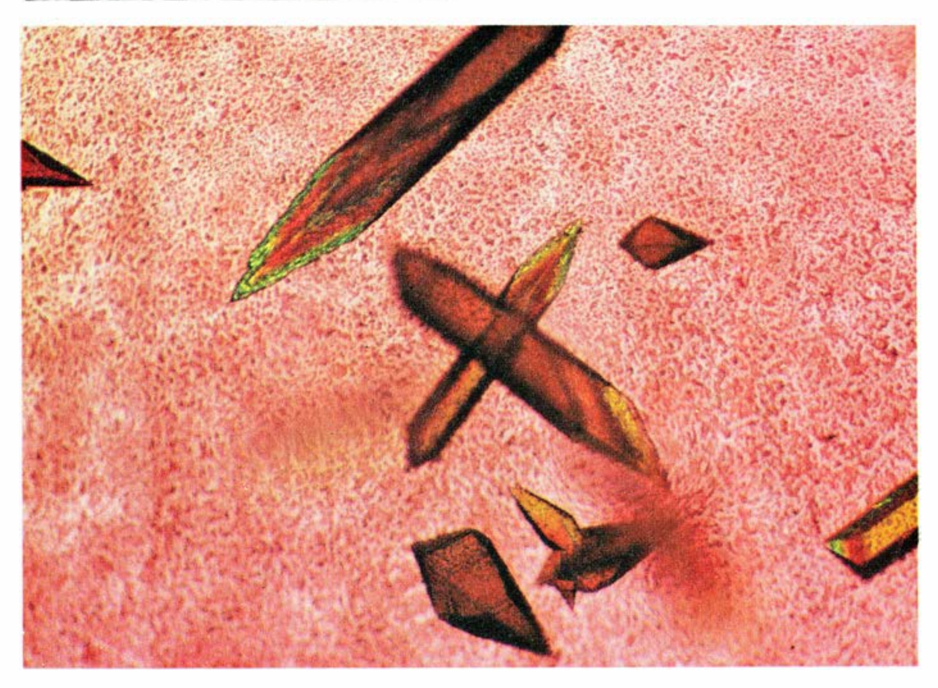








4. ESTRUCTURA POROSA de cristales macromoleculares evidenciada en una micrografía electrónica de un cristal de una enzima bacteriana (*arriba*). Los canales oscuros aparecen con mayor nitidez en la ampliación (*izquierda*). Estos canales, responsables de la extrema fragilidad de los cristales, facilitan también caminos para la difusión de moléculas pequeñas. En la fotografía inferior, el color no se obtiene por luz polarizada, sino mediante un fármaco de color rojo que ha penetrado en los canales de disolvente en el cristal y se ha unido a las moléculas formando la red cristalina.



marea cuando se evapora lentamente el agua de la charca.

Por desgracia para nosotros, la cristalización de las macromoléculas no es tan sencilla. El número de enlaces que forma una macromolécula con sus vecinos en un cristal es mucho menor, en proporción al peso molecular, cuando se compara con el de los que se forman en cristales de moléculas menores como la sal. Las interacciones de la red mantienen la integridad de un cristal; por tanto, los cristales macromoleculares son mucho más delicados que los cristales de moléculas menores.

Las proteínas sueltas y los ácidos nucleicos, además, pierden fácilmente su estructura natural en condiciones hostiles relativamente suaves, y por ello las únicas condiciones que pueden mantener el crecimiento del cristal de una macromolécula dada son aquellas que no producen perturbaciones de las propiedades de la molécula. El crecimiento de los cristales de proteínas y ácidos nucleicos se produce en líquidos madres, disoluciones con un rango tolerable de acidez, temperatura y fuerza iónica. Al deshidratarse, los cristales se desmoronan, por eso están siempre sumergidos en el líquido madre.

Podemos asociar los cristales de macromoléculas a geles ordenados que poseen extensos canales de disolvente y cavidades. Mientras los cristales de las moléculas menores como la sal apenas contienen disolvente, en caso de que lo posean, los cristales macromoleculares contienen aproximadamente un 50 por ciento de disolvente (esta cifra puede variar del 30 al 90 por ciento). Debido a los grandes espacios intersticiales y a las débiles fuerzas reticulares, las posiciones de las moléculas en un cristal macromolecular quizá no resulten perfectamente equivalentes, es decir, pueden variar ligeramente de una celdilla unidad a otra.

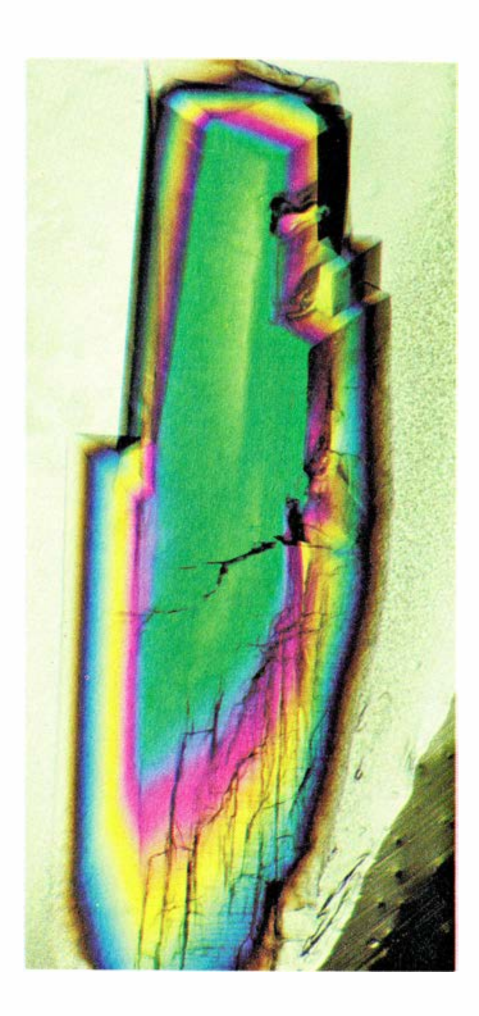
La porosidad de los cristales de proteínas y ácidos nucleicos condiciona la difracción de rayos X y el procedimiento de cristalización. El nivel de detalle con el que pueden determinarse las posiciones atómicas por análisis de difracción se corresponde íntimamente con el grado de orden cristalino; cualquier heterogeneidad ("inhomogeneidad") de un cristal puede comprometer los diagramas de difracción. Los cristales macromoleculares son propicios a las heterogeneidades debido a las débiles fuerzas de su red. Por consiguiente, mientras los cristales de moléculas pequeñas producen con frecuencia una

difracción hasta casi el límite teórico de resolución, los cristales de macromoléculas suelen caracterizarse por diagramas de difracción muy limitados.

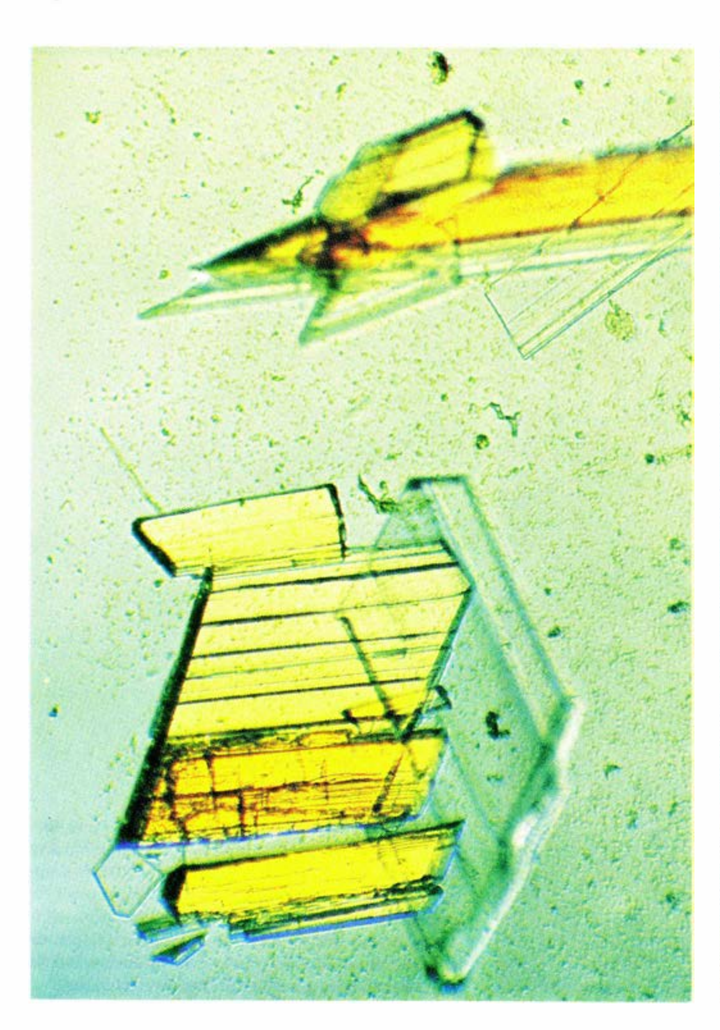
El alto contenido de disolvente de los cristales macromoleculares no es, sin embargo, un rasgo completamente negativo. Las estructuras moleculares son casi iguales a las que existen en la realidad debido a la hidratación. El bioquímico puede, por tanto, observar muchas propiedades de la proteína o del ácido nucleico de la misma forma que aparecerían en su contexto natural. Además, los canales de disolvente de las macromoléculas adquieren magnitud suficiente para admitir compuestos que interaccionan con las proteínas y los ácidos nucleicos: iones, sustratos enzimáticos, inhibidores, fármacos, etcétera. El bioquímico puede, por consiguiente, estudiar estas interacciones cubriendo el líquido madre —y por tanto el propio cristal— con el compuesto en cuestión.

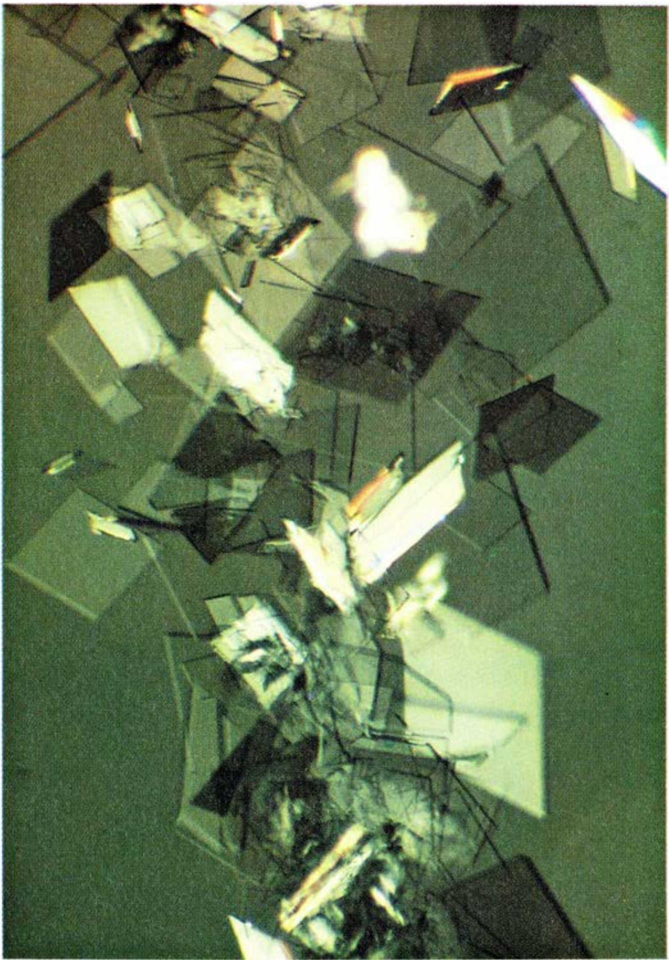
En el crecimiento de cristales de macromoléculas, el límite de maniobra es "gradual". Cualquier cambio abrupto en la saturación producirá la precipitación de un sólido amorfo en vez de la cristalización. El método estándar para la cristalización macromolecular consiste en equilibrar una disolución altamente concentrada con un agente de precipitado; si se introduce con suficiente lentitud —por difusión de vapor, por ejemplo— el agente inducirá la cristalización en vez de la precipitación.

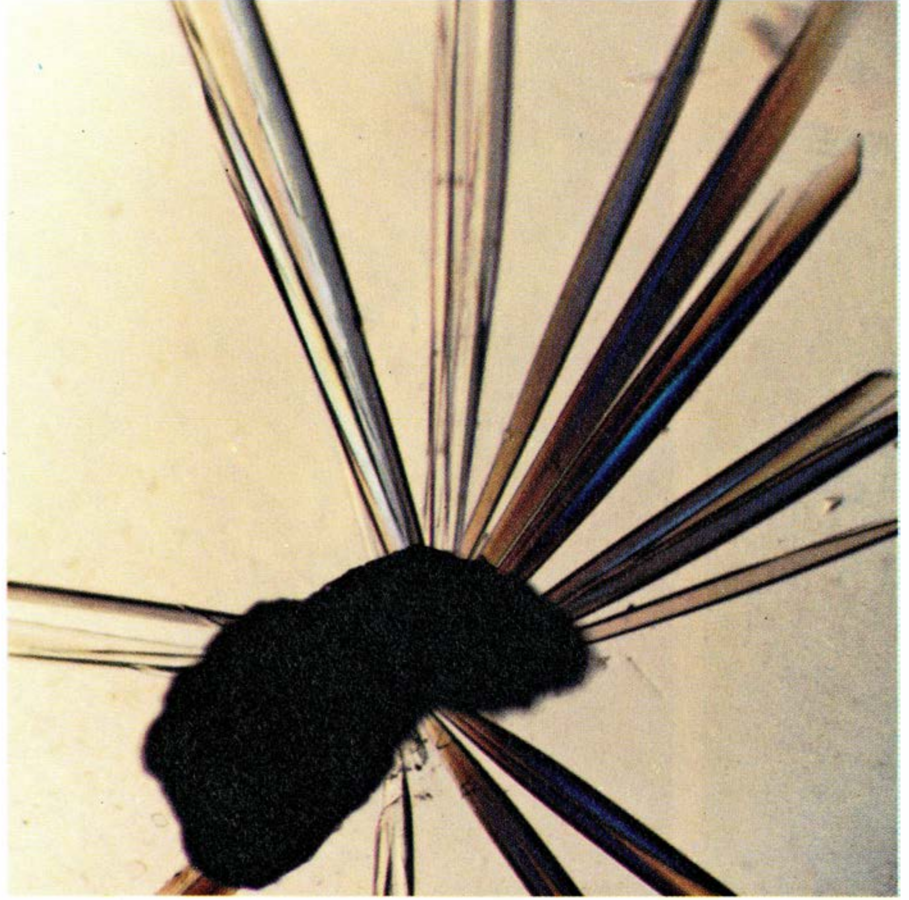
Los agentes de precipitado comprenden sales como el sulfato amónico, disolventes orgánicos como el etanol y polímeros solubles como el glicol de polietileno. Los tres agentes actúan de forma ligeramente diferente, pero todos estimulan la interacción de las macromoléculas en la disolución. Las sales compiten por el agua con las macromoléculas disueltas, favoreciendo, por tanto, las interacciones entre ellas, y no con el agua. Los disolventes orgánicos



5. CRISTALES DEFECTUOSOS e imperfecciones que presentan. Las grietas y los escalones que se producen por crecimiento esporádico desfiguran el prisma de la derecha. Las distorsiones y las estrías superficiales de los cristales en la parte inferior izquierda reflejan heterogeneidades presentes en el crecimiento y la ordenación de las celdillas unidad. Las placas rómbicas de la parte inferior derecha son demasiado finas y pequeñas para utilizarse en el análisis cristalográfico de rayos X.







6. SUSTRATO MINERAL que promueve la formación de cristales de proteínas suministrando una base ordenada para la nucleación. Un trozo de magnetita sirve en este caso como plataforma para los cristales de concanavalina B. El autor espera utilizar sustratos minerales para especificar formas de crecimiento cristalino y estimular la nucleación de macromoléculas que son difíciles de cristalizar.

7. FORMAS POLIMORFICAS de la misma proteína: surgen con frecuencia y simultáneamente durante el crecimiento cristalino en un mismo "líquido madre". Las distintas formas inducen a pensar en la posible existencia de distintas morfologías de una molécula de proteína bajo un conjunto dado de condiciones; cada configuración utilizaría un grupo espacial diferente y desarrollaría un cristal distinto.

aumentan la intensidad de los campos electrostáticos que atraen mutuamente a las moléculas de proteínas. Los polímeros inducen ambos efectos y traban también una red con el agua que tiende a excluir a las macromoléculas.

Los agentes de precipitado pueden servir para llevar una disolución altamente concentrada hasta un punto que esté justo por debajo de la supersaturación; ésta se alcanza posteriormente modificando alguna propiedad física de la disolución, como la acidez o la temperatura, para reducir la solubilidad de la proteína o del ácido nucleico. Se trata de un procedimiento análogo al de saturación del agua hirviendo con azúcar y su posterior enfriamiento para producir caramelo.

La cristalización por cualquiera de los métodos actuales es impredecible. Cada macromolécula es una estructura única tridimensional con características superficiales propias y además posee propiedades físicas y químicas únicas. Por esta razón las lecciones aprendidas en la investigación de una proteína o de un ácido nucleico raramente se pueden aplicar a otras.

Para complicar aún más las cosas, parece que las proteínas y los ácidos nucleicos son entidades bastante dinámicas; la misma molécula puede incluso existir en varias formas diferentes bajo condiciones idénticas o en una disolución. Por consiguiente, muchas proteínas y ácidos nucleicos crecen con diversas celdillas unidad, obteniéndose las formas polimórficas observadas en series únicas de cristales. Las propiedades de difracción de una forma cristalina son, con frecuencia, más convenientes que las de las formas alternativas; la incapacidad para dictaminar la morfología que adopta un cristal macromolecular específico puede ser bastante frustrante.

Junto con mi colega Paul J. Schlichta me propuse controlar el curso del crecimiento cristalino sembrando disoluciones de proteínas con fragmentos de minerales. Este procedimiento se inspiraba en el ejemplo de la fabricación de semiconductores, donde la estructura molecular de un sustrato de silicio se utiliza para definir la estructura de una capa superpuesta. Nuestros resultados han sido prometedores, descubriendo que las "plataformas" minerales ayudan a la nucleación de los cristales y también pueden colaborar para confinar su crecimiento a una determinada morfología. En la mayoría de los casos, sin embargo, no hemos podido establecer cómo se relaciona una morfología de cristal de proteínas con la estructura atómica del sustrato mineral.

También he venido trabajando con bioquímicos de los Estados Unidos en el proyecto de experimentos de crecimiento de cristales en condiciones de microgravedad. Hasta ahora, los experimentos de cristalización de proteínas han viajado en cinco vuelos del transbordador espacial y hay preparados varios más a lo largo de este año. Queremos averiguar si los cristales macromoleculares crecen con mayor uniformidad en ausencia de la turbulencia producida por la gravedad. Los resultados que hemos recogido hasta la fecha son esperanzadores, aunque demasiado limitados para suministrar una prueba definitiva de posibles ventajas.

Otros factores significativos pueden contribuir al logro de un crecimiento cristalino, o desvirtuarlo. Los contaminantes pueden prevenir el crecimiento o dar lugar a defectos en los cristales, por lo que las preparaciones de proteínas, así como los agentes de precipitado, deben ser bastante puros. Las preparaciones han de normalizarse también si se han de reproducir los resultados con exactitud. Además, la nucleación de cristales constituye todavía un proceso al albur de la probabilidad, carente de determinación previa. La cristalización de macromoléculas, verdadero rompecabezas, se ha convertido en un desafío y en una oportunidad abierta.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

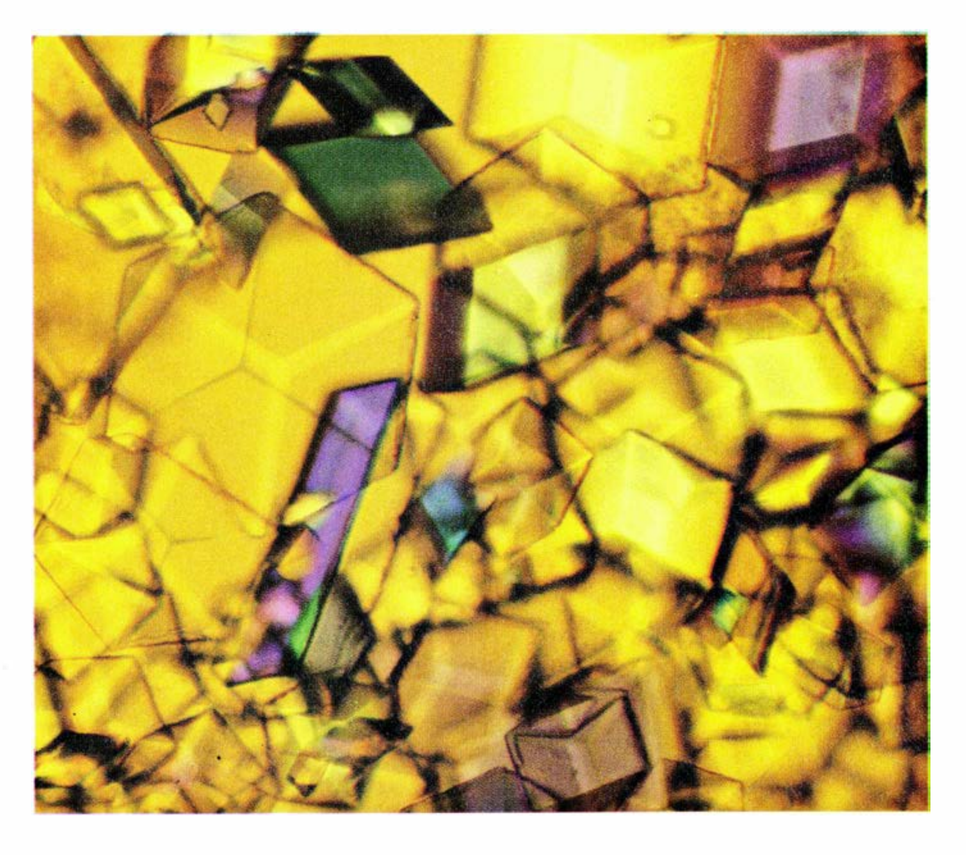
THE USE OF X-RAY DIFFRACTION IN THE STUDY OF PROTEIN AND NUCLEIC ACID STRUCTURE. K. C. Holmes y D. M. Blow. John Wiley & Sons, Inc., 1966.

THE ANATOMY AND TAXONOMY OF PROTEIN STRUCTURES. Jane S. Richardson en *Advances in Protein Chemistry*, vol. 34, págs. 167-339; 1981.

THE PREPARATION AND ANALYSIS OF PROTEIN CRYSTALS. Alexander McPherson. John Wiley & Sons, Inc., 1982.

NEW DIRECTIONS IN PROTEIN CRYSTAL GROWTH. L. J. De Lucas y C. E. Bugg en *Trends in Biotechnology*, vol. 5, págs. 188-192; 1987.

USEFUL PRINCIPLES FOR THE CRYSTALLIZATION OF PROTEINS. Alexander McPherson en *The Cristallization of Membrane Proteins*, editado por Hartmut Michel. CRC Press, en prensa.



8. CRISTALES CRECIDOS EN EL ESPACIO a bordo del transbordador espacial *Discovery* durante su vuelo del último septiembre. Los cristales forman parte de una serie de experimentos en microgravedad que sigue todavía en marcha. La ausencia de convección impulsada por la gravedad y de sedimentación en el líquido madre puede ser responsable del crecimiento generalmente perfecto de estos cristales.

Modelización del ciclo geoquímico del carbono

Los procesos geoquímicos naturales que intervienen en la formación del dióxido de carbono atmosférico pueden haber determinado los aumentos de temperatura de los períodos geológicos a través del efecto invernadero

Robert A. Berner y Antonio C. Lasaga

Imaginemos, por un momento, el día del juicio final, en que la vida sobre la Tierra ha quedado, de repente, aniquilada. Más aún, que todo el carbono perteneciente a materia orgánica muerta se quemase para formar dióxido de carbono y pasara a la atmósfera. La cantidad de dióxido de carbono que se generaría en este escenario sería menor que la que el hombre ha provocado consumiendo combustibles fósiles en 200 años de revolución industrial.

Este breve ejercicio mental nos muestra que la mayor parte del carbono no se encuentra retenido en los tejidos de los seres vivos o en los que han muerto recientemente, sino en las rocas sedimentarias. No es de extrañar, pues, que el conocido ciclo biológico del carbono —en el que el dióxido de carbono atmosférico es recogido por las plantas, transformado, a través de la fotosíntesis, en materia orgánica y posteriormente liberado por la respiración vegetal y la descomposición bacteriana— sea sólo una componente de un ciclo mucho mayor: el ciclo geoquímico del carbono.

ROBERT A. BERNER Y ANTONIO C. LASAGA trabajan en el departamento de geología y geofísica de la Universidad de Yale. Han colaborado, durante siete años, en la investigación del ciclo geoquímico del carbono. Berner inició su formación en la Universidad de Michigan y se doctoró, en 1962, en la Universidad de Harvard. Presidió la Sociedad Geoquímica y es miembro de la Academia Nacional de Ciencias. Tiene a su cargo la cátedra Alan M. Bateman de Yale. Lasaga recibió el doctorado, en 1976, en la Universidad de Harvard. Actualmente es profesor de geoquímica en Yale y su investigación está principalmente encaminada a la aplicación de la mecánica cuántica al nuevo campo de la física mineral.

Así como el ciclo biológico del carbono controla la transferencia del mismo entre plantas y animales y sus entornos, el ciclo geoquímico controla esa transferencia entre rocas sedimentarias situadas sobre la superficie terrestre o en su vecindad, por un lado, y la atmósfera, la biosfera y los océanos, por otro. El papel desempeñado por el dióxido de carbono en ambos ciclos es de primordial importancia; el carbono se encuentra almacenado en la atmósfera principalmente en forma de dióxido de carbono. Tal y como podemos inferir de la hipotética visión catastrófica a la que nos referíamos al principio, hacia el año 2050 la combustión de carbón y de petróleo —que representan una pequeñísima parte del carbono integrante de las rocas— habrá cambiado de manera significativa la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera. Dado que la liberación de dióxido de carbono debido a las actividades humanas es mucho más rápida que la natural, el hombre está "acortando" el ciclo del carbono. Lo que nos ha llevado a una situación inquietante en que la quema de combustible fósil podría condicionar el clima de la Tierra a través del efecto invernadero.

El mecanismo de ese efecto se conoce desde 1896, por lo menos. Ese año el químico sueco Svante August Arrhenius descubrió que el dióxido de carbono permitía la entrada de radiaciones solares de onda corta a través de la atmósfera, y atrapaba esa energía cuando la superficie terrestre la reemitía en forma de radiaciones de mayor longitud de onda. El efecto del dióxido de carbono atmosférico es el mismo que el producido por la carpa de un invernadero; en ambos casos, el resultado es un aumento de la temperatura; cuanto mayor sea la cantidad de dióxido de carbono, mayor será el calentamiento.

El calentamiento actual por efecto invernadero se debe principalmente a la quema de combustibles fósiles. Las variaciones en el ciclo biológico del carbono inducen también la aparición de cambios en la concentración del dióxido de carbono atmosférico, pero son cambios lentos que abarcan períodos de decenas de miles de años. Pero si nos referimos al tiempo geológico, cuya escala se mide en millones de años, apreciaremos una serie de procesos geoquímicos naturales mucho más lentos que son, de lejos, los reguladores más importantes del contenido de dióxido de carbono en la atmósfera y en los océanos. Estos procesos pudieron constituir la causa de antiguos períodos de calentamiento atmosférico debidos al efecto invernadero. Se impone, pues, desentrañar el ciclo geoquímico del carbono, no sólo por razones científicas, sino también para conocer mejor la intervención humana en el desarrollo del mismo.

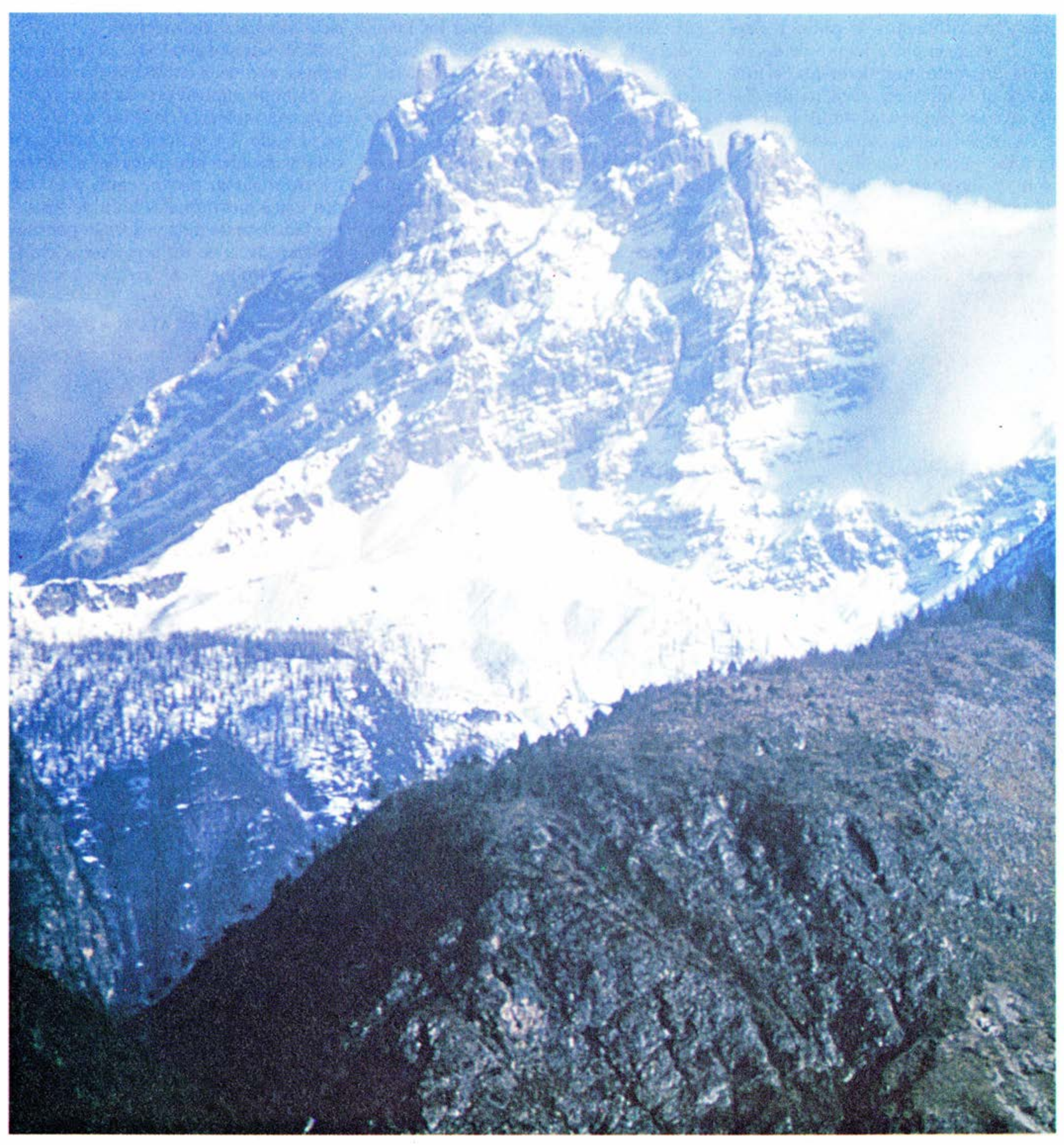
Algunos aspectos del ciclo fueron estudiados en el siglo pasado por el geólogo Thomas C. Chamberlain. Lo abordaron después otros autores (entre los que cabe destacar a Harold C. Urey); pero no fue hasta la pasada década cuando se situó el ciclo geoquímico del carbono dentro del marco general de la teoría de la tectónica de placas, una ubicación que más adelante trataremos con detalle.

La senda obvia para seguir el ciclo arranca de las rocas situadas en los continentes [*véase la figura 2*]. El carbono se aloja preferentemente en rocas sedimentarias que contienen dos tipos de componentes: kerógeno y carbonatos. El kerógeno (materia orgánica sedimentaria) representa los restos blandos

de antiguos animales y plantas, mientras que las rocas carbonatadas proceden, en su mayor parte, de la acumulación de fragmentos de esqueletos de organismos (por lo general marinos). El kerógeno se encuentra en las pizarras, sobre todo; los carbonatos, en calizas y dolomías. El carbón y el petróleo proceden también de los tejidos blandos de antiguos animales y plantas, pero no son, ni con mucho, tan abundantes como el kerógeno [*véase la figura 3*].

Durante la meteorización geoquímica, por la cual las rocas del suelo se descomponen en su exposición a diferentes ácidos y gases húmicos, el kerógeno se limita a reaccionar con el oxígeno para producir CO_2; éste, con el tiempo, pasa a la atmósfera. El proceso, aunque lento y natural, remeda la quema de combustibles fósiles.

Mayor complejidad reviste la meteorización de los carbonatos. Los carbonatos de magnesio y calcio ($MgCO_3$ y $CaCO_3$), constituyentes de dolomitas y calcitas, son atacados por los ácidos presentes en el agua subterránea; en particular, por el ácido carbónico (H_2CO_3), que se forma en los suelos cuando el dióxido de carbono resultante de la descomposición de la materia orgánica reacciona, durante el ciclo



1. MONTE CAVALLO, situado en Las Dolomitas italianas, macizo que dio su nombre a la dolomita, mineral constituido por calcio, carbono, magnesio y oxígeno ($CaMgCO_3$). En formaciones dolomíticas como Monte Cavallo se encuentran los mayores depósitos de carbono de la Tierra. El carbono liberado durante la meteorización ácida, tanto de las dolomitas como de otras rocas, entra a formar parte del ciclo geoquímico de ese elemento. (Cortesía de Brian J. Skinner.)

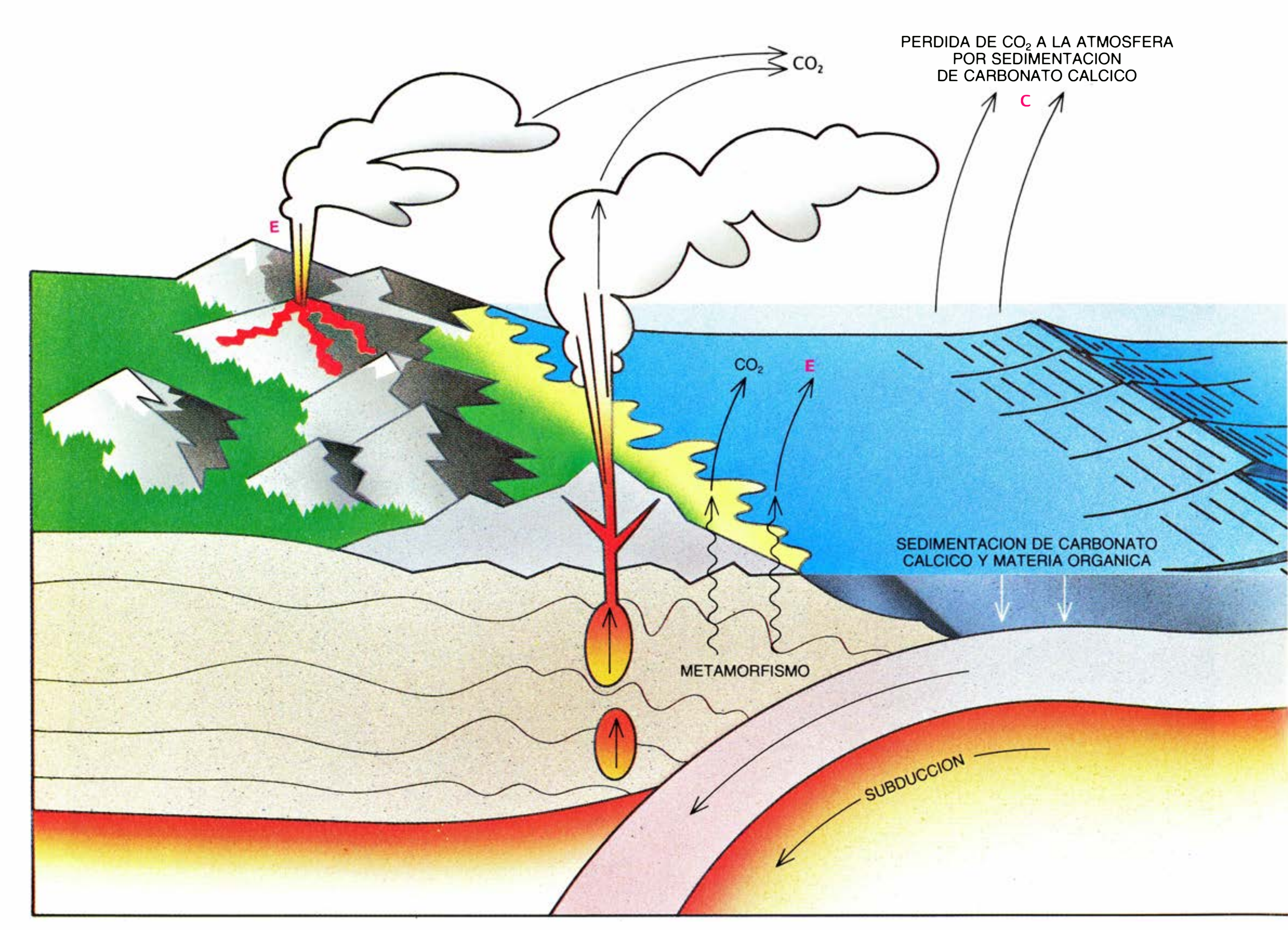
biológico del carbono, con el agua. (En el fondo, la fuente del ácido carbónico es el dióxido de carbono atmosférico, que pasa a formar parte de la materia orgánica a través de la fotosíntesis.) La acción del ácido carbónico en las rocas carbonatadas proporciona iones disueltos de calcio y magnesio y dos iones bicarbonato (HCO_3^-). En estas reacciones, uno de los iones bicarbonato procede del carbonato cálcico o magnésico y el otro del ácido carbónico.

Las reacciones entre el ácido carbónico y los carbonatos de calcio y magnesio no son la única fuente de los iones bicarbonato. Los minerales del grupo de los silicatos, recuérdense los abundantes feldespatos de los granitos y basaltos (simbolizados aquí por la fórmula general $CaSiO_3$), producen también iones bicarbonato bajo la acción meteorizante del ácido carbónico. Por carecer de átomos de carbono los silicatos, todo el carbono de los iones bicarbonato resultantes procederá del ácido carbónico. Aun con todo, y según demostraremos más adelante, la meteorización de los silicatos importa más que la de los carbonatos, ya que ejerce un control a largo plazo sobre el dióxido de carbono atmosférico.

Una vez liberados por el proceso de meteorización, los iones calcio y bicarbonato son arrastrados por el agua subterránea a los arroyos cercanos, después a los ríos y, finalmente, a los océanos. Aquí los organismos del plancton y los corales toman los iones calcio y bicarbonato para construir conchas o esqueletos de carbonato cálcico. Cuando estos organismos mueren, el carbonato cálcico se deposita en el fondo marino que, con el tiempo, queda cubierto de sedimentos. Este enterramiento de carbonatos es responsable del 80 por ciento aproximadamente del carbono depositado en el suelo oceánico; el 20 por ciento restante resulta del enterramiento de materia orgánica muerta, producida a partir de la fotosíntesis terrestre y marina, junto con materiales procedentes del continente que fueron llevados por los ríos al mar.

En aquellas reacciones en las que se ven involucrados los carbonatos, sólo la mitad de los iones bicarbonato acaban transformándose en carbonato cálcico y se depositan en el suelo oceánico. La otra mitad se convierte en dióxido de carbono y acaba escapando a la atmósfera, tal vez después de pasar por la fotosíntesis y por la respiración del ciclo biológico del carbono.

Si resumimos esta parte del ciclo, tenemos que cada molécula de dióxido de carbono atmosférico da como resultado una molécula de ácido carbónico en el suelo. La molécula de ácido carbónico disuelve minerales del grupo de los carbonatos, produciendo a su vez dos iones bicarbonato. Uno de los iones bicarbonato se transforma, por medio de una serie de organismos marinos, en carbonato cálcico que, a su vez,



2. EL CICLO GEOQUIMICO DEL CARBONO controla la transferencia del mismo entre la tierra, los océanos y la atmósfera. Las plantas toman el dióxido de carbono (CO_2) de la atmósfera, fijándolo en el suelo, donde se combina con el agua para formar ácido carbónico (H_2CO_3). Este ácido meteoriza los minerales del grupo de los carbonatos y del de los silicatos ($CaCO_3$, y $CaSiO_3$, respectivamente) para producir iones bicarbonato (HO_3^-), iones calcio (Ca^{++}) y sílice disuelta (SiO_2). Estos productos llegan, transportados por los ríos, hasta el océano, cuya fauna sintetiza nuevamente los iones calcio y bicarbonato en

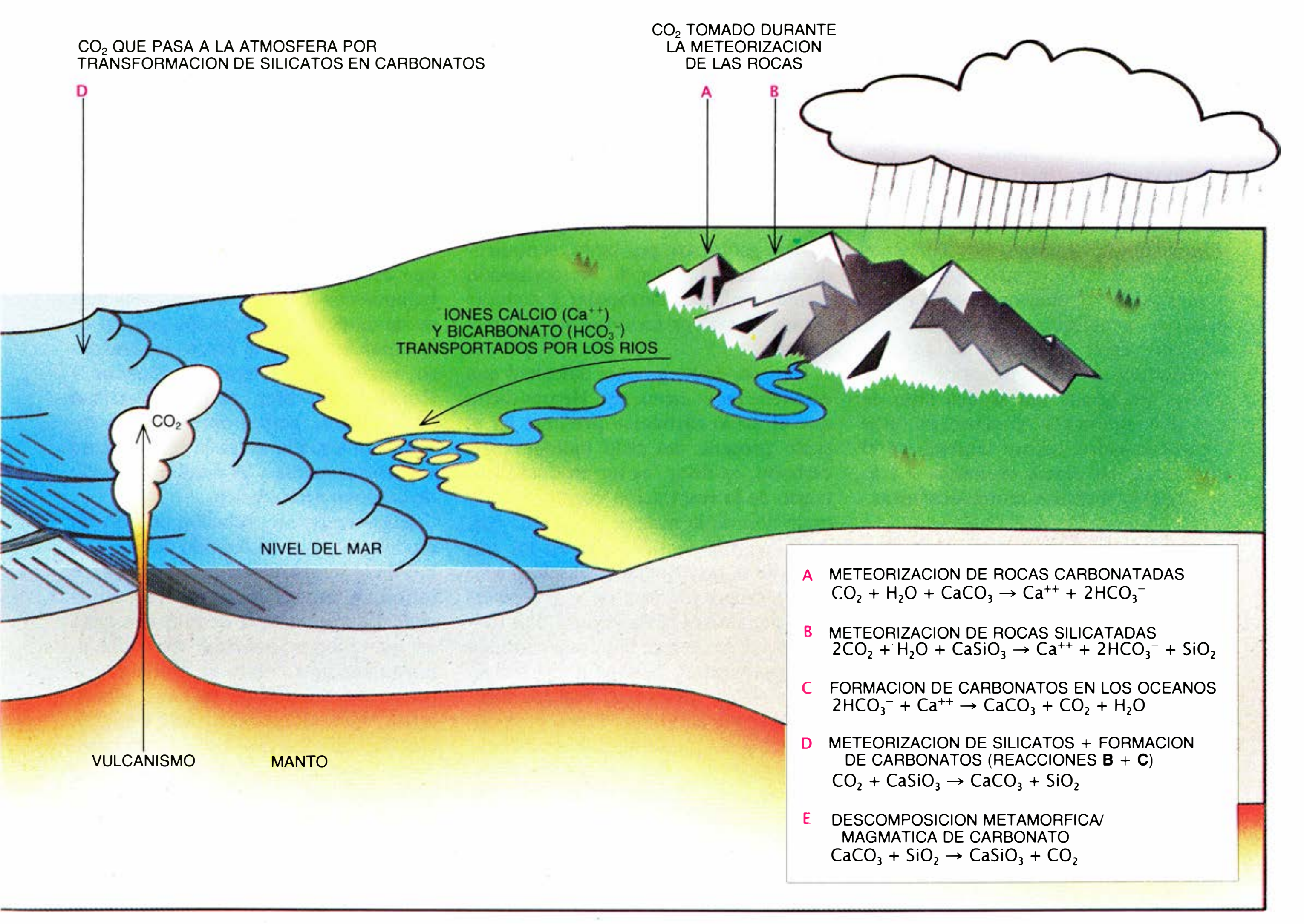
es enterrado en el fondo oceánico, para acabar convirtiéndose en una roca sedimentaria; el otro ion bicarbonato se transforma en dióxido de carbono. De este modo, todo el dióxido de carbono atmosférico tomado durante la meteorización de los carbonatos acaba volviendo a la atmósfera.

No ocurre lo mismo con la meteorización de los silicatos. Durante dicha meteorización, recordémoslo, se producen dos iones bicarbonato. También se producen iones calcio, ya que los silicatos (por ejemplo los feldespatos), contienen calcio en su estructura. Cuando los iones bicarbonato y calcio llegan al océano, se combinan, por intervención de organismos marinos, para producir carbonato cálcico. En otras palabras, el producto final de la meteorización de los silicatos es el carbonato cálcico. Si seguimos este conjunto de reacciones, veremos que sólo la mitad del dióxido de carbono tomado de la atmósfera durante la meteorización de los silicatos retorna a la misma. Así, pues, la meteorización de los silicatos encierra sumo interés e implica una pérdida neta de dióxido de carbono atmosférico.

Si este proceso se desarrollara sin ningún tipo de restricción durante un período de unos 10.000 años (o unos 300.000 años si se mantuviera el intercambio gaseoso con el océano), la meteorización de los silicatos determinaría la eliminación total del dióxido de carbono atmosférico. Eso no ha ocurrido, desde luego; de haber acontecido, no habría vida en la Tierra. Tiene que existir algún mecanismo que devuelva dióxido de carbono a la atmósfera. Este mecanismo es la liberación de dióxido de carbono que acompaña a las erupciones volcánicas y demás fenómenos relacionados con ellas.

En su enterramiento a profundidades de varios kilómetros, los carbonatos de calcio y magnesio se encuentran con temperaturas capaces de desencadenar reacciones entre el calcio, el magnesio y los silicatos circundantes. Estas reacciones producen nuevos silicatos y dióxido de carbono. (Las reacciones que transforman el estado cristalino de las rocas se denominan metamórficas; e ígneas, si intervienen procesos de fusión.) El dióxido de carbono acaba por encontrar salida a la atmósfera, a veces de forma drástica en el curso de una erupción volcánica, a veces casi imperceptiblemente, como ocurre en un manantial carbónico, de donde puede ir a parar a una botella de agua mineral. Con la liberación de dióxido de carbono instada por la sedimentación de carbonatos, que hemos comentado antes, tal proceso es la causa principal por la cual el carbono retorna a la atmósfera, cerrando así el ciclo geoquímico de este elemento.

La dinámica de esta liberación de gases, y del ciclo geoquímico del carbono en general, recibe una explicación más



carbonato cálcico, liberando CO_2, que torna a la atmósfera. La meteorización de las rocas carbonatadas no representa una pérdida neta de CO_2 atmosférico. Si bien los iones bicarbonato y calcio producidos durante la meteorización de los silicatos también se combinan para formar carbonato cálcico, en estas reacciones sólo la mitad del CO_2 de la atmósfera vuelve a ella, dando como resultado una pérdida neta de CO_2 atmosférico. El equilibrio se restablece en lo profundo de la Tierra, donde el carbonato cálcico y el dióxido de silicio reciben calor suficiente para producir silicato cálcico y CO_2. Este CO_2 retorna a la atmósfera.

FORMA	CARBONO (10^{18} gramos)	CARBONO BIOLOGICO
Carbonato cálcico (rocas sedimentarias en general)	35,000	62,500
Carbonato de Ca/Mg (rocas sedimentarias en general)	25,000	44,600
Materia orgánica sedimentaria (kerógeno)	15,000	26,800
Carbonatos y bicarbonatos disueltos en los océanos	42	75
Combustibles fósiles recuperables (carbón y petróleo)	4.0	7.1
Carbono superficial (humus, caliche, etcétera)	3.0	5.4
Dióxido de carbono atmosférico	0.72	1.3
Biosfera (animales y plantas)	0.56	1

3. RELACION DE LA CANTIDAD DE CARBONO presente en la Tierra en sus diferentes estados; por una parte, en unidades de 10^{18} g, y por otra, en relación con la concentración hallada en los organismos. Como puede observarse, hay mucho más carbono almacenado en carbonatos (restos fósiles de esqueletos animales) y kerógeno (restos de tejidos blandos de animales) que en la materia orgánica viva o en la muerta y acumulada en superficie. Nos indica ello que el ciclo geoquímico del carbono es el responsable de la regulación del CO_2 atmosférico a lo largo del tiempo geológico, tiempo que se mide en millones de años.

justa dentro del marco de la tectónica de placas. Aunque dicha liberación ocurra en distintos puntos de la corteza terrestre, se revela especialmente frecuente en las zonas de subducción, es decir, en las regiones donde colisionan dos de las grandes placas que constituyen la corteza. En este proceso, una placa subduce bajo la otra, arrastrando consigo rocas carbonatadas hacia el manto, donde se verán sometidas a altas temperaturas.

Ivan Barnes, William P. Irwin y Donald E. White, del Servicio Geológico estadounidense, han publicado un mapa en el que se demuestra la excelente correlación entre la localización de manantiales carbónicos y las zonas de la corteza terrestre afectadas por fenómenos de subducción, Japón es un ejemplo, estableciendo así la conexión existente entre liberación de gases y subducción. A pesar de esto, no debemos quedarnos con la idea falsa de que dicha liberación no ocurre en otras zonas corticales; ocurre también en el interior de las placas oceánicas o a lo largo de las dorsales centro-oceánicas.

La meteorización, el enterramiento y la liberación de gases, entre otras vertientes del ciclo geoquímico del carbono, pueden analizarse de forma cuantitativa y ajustarse a modelos de ordenador. En colaboración con Robert M. Garrels, de la Universidad del Sur de Florida, realizamos un programa de ordenador que nos ha permitido comprender mejor el ciclo geoquímico del carbono y, "retrocediendo en el tiempo", calcular el nivel de dióxido de carbono planetario existente en un pasado lejano. Antes de entrar en lo que el modelo es capaz de retrodecir, vale la pena comentar, con cierto detalle, los supuestos en que se basa y la información que requiere.

No hace falta insistir en la importancia de la tasa de meteorización química de las rocas para determinar la proporción de dióxido de carbono consumido. Meteorización que depende, a su vez, de la cantidad de roca expuesta, en superficie, a la acción de los ácidos del suelo; cabe, pues, admitir que la tasa de meteorización existente en el mundo, para un instante dado, es proporcional a la superficie total de tierra emergida. Del mismo modo, los cambios producidos en la tasa de meteorización deberán ser proporcionales a las variaciones de superficie sufridas por los continentes. Podemos ya realizar estimaciones sobre las variaciones de la superficie continental a lo largo del tiempo geológico; por tanto, suponiendo conocida la tasa de meteorización actual, podemos extrapolar y conocer la tasa de meteorización existente en el pasado.

Hay, sin embargo, una dificultad que conviene tener en cuenta. Hemos dicho que el ácido carbónico presente en el suelo procede del ciclo biológico del carbono, es decir, es un producto primario de la respiración vegetal y de la pudrición de la materia orgánica. Así, pues, tendría sentido que, en los cálculos de la tasa de meteorización, sólo incluyéramos la parte de tierra emergida que alojara masa vegetal. Por desgracia, no se conoce bien esta cantidad de masa vegetal, aunque sí existen algunas pistas. Gracias al registro fósil, sabemos que durante el Triásico, período geológico que se inicia hace 240 millones de años y abarca unos 30, la superficie ocupada por los desiertos era mayor que en la actualidad. Además, antes del Silúrico superior, hace unos 420 millones de años, no había apenas plantas vasculares y, por tanto, la meteorización debida a los procesos biológicos era probablemente menor. A pesar de todo, y ante las muchas dudas existentes, nos hemos limitado a incluir en nuestro programa el total de superficie continental emergida.

La tasa de meteorización se ve también afectada por la temperatura. A su vez, ésta influye en la actividad biológica y en la cantidad de lluvia caída. Diversas observaciones demuestran que el aumento de la temperatura media anual eleva la proporción de carbonatos y silicatos disueltos por ácidos y, en consecuencia, fomenta la concentración de iones bicarbonato. En este sentido, los análisis químicos realizados en aguas subterráneas corroboran que el contenido en bicarbonato disuelto en las mismas aumenta con la temperatura. De forma similar, el contenido en sílice disuelto en los ríos del mundo es mayor en las áreas de clima más cálido. Además, en los modelos teóricos del clima, se observa fácilmente que la evaporación global del agua se acelera con la subida de las temperaturas; esta misma causa acelera también la pluviosidad mundial, dando como resultado una mayor tasa de meteorización.

Para crear un modelo del ciclo geoquímico del pasado, precisamos la estimación de la temperatura anual media de la época. Ahora bien, en vez de apoyarnos en los cálculos realizados por paleoclimatólogos, hemos supuesto que la temperatura del pasado estaba controlada, ante todo, por la cantidad de dióxido de carbono atmosférico, que actuaba de gas invernadero. Trabajando con los resultados procedentes de un modelo de circulación general de la atmósfera bajo el efecto invernadero, realizado por Syukuru Manabe y Ronald J. Stouffer, de la Universidad de Princeton, hemos obtenido una correlación sencilla entre la temperatura superficial media y el nivel de dióxido de carbono atmosférico.

Empleamos esta relación en nuestro modelo; el nivel de dióxido de carbono nos da la temperatura que, a su vez, se introduce en las tasas de meteorización. La importancia de lo cual estriba en que proporciona una retroalimentación negativa contra un aumento excesivo del dióxido de carbono atmosférico. Una alta concentración de dióxido de carbono equivale a tener mayores temperaturas, lo que, a su vez, causa una mengua más rápida del dióxido de carbono atmosférico a través de la meteorización. Forma parte de nuestro procedimiento recalcular, a cada paso, el nivel de dióxido de carbono atmosférico en función de todos los demás procesos del modelo. El nuevo valor obtenido se utiliza para calcular nuevas tasas de meteorización, y

así sucesivamente. No obstante su complejidad, este método ofrece una ventaja: el cálculo de las temperaturas del pasado, realizado de forma independiente por los paleoclimatólogos, sirve para someter a prueba el acierto del modelo.

Al llegar a este punto, surge una nueva complicación que, hasta el momento, hemos preferido ignorar. Muchos estudios experimentales demuestran que el crecimiento vegetal se beneficia con la acción de altos niveles de dióxido de carbono en los suelos, así como un aumento de las tasas de meteorización, independientemente de la temperatura. Un mayor nivel de dióxido de carbono podría producir incluso un aumento del área colonizada por la masa vegetal. Por otra parte, en bosques tropicales y zonas afines, el crecimiento de las plantas se encuentra limitado por la disponibilidad de nutrientes y, por tanto, no tiene por qué existir un auge a pesar del mayor nivel de dióxido de carbono. Ante la ausencia de datos fiables sobre la respuesta de las plantas a la variación mundial del dióxido de carbono, no hemos tenido en cuenta el efecto directo de ese gas en la meteorización; suponemos que la tasa de meteorización es función indirecta del dióxido de carbono atmosférico, a través de su efecto sobre la temperatura.

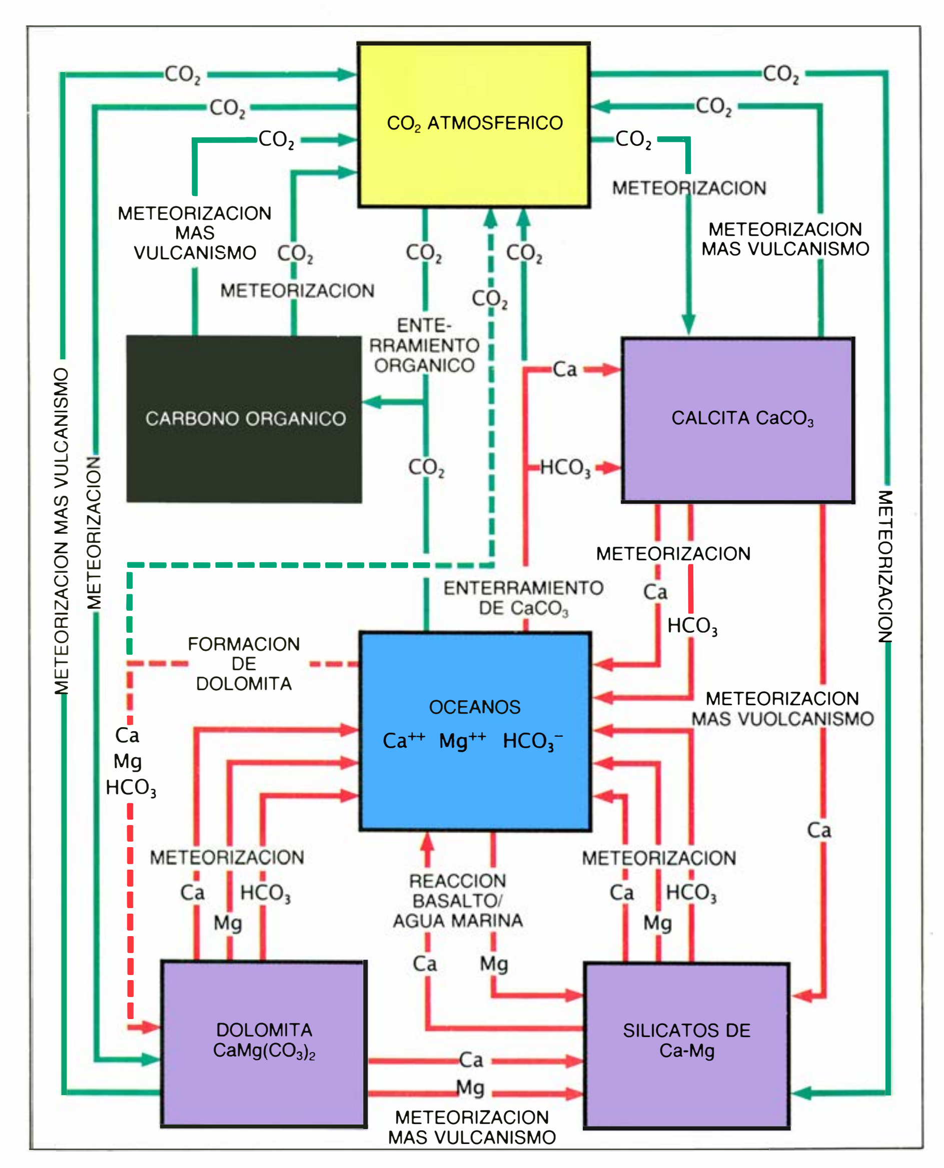
Queda una última complicación que incide en la tasa de meteorización, la topografía: las zonas elevadas y con fuerte relieve se ven sujetas a una erosión mayor que las bajas y de relieve suave, lo que redunda en un aumento de la cantidad de dióxido de carbono resultante. Sin embargo, son escasos de nuevo los datos fiables, razón por la cual no incluimos en nuestro modelo los efectos de la topografía.

Para completar el ciclo geoquímico del carbono, necesitamos conocer la tasa de sedimentación y enterramiento de la materia orgánica, es decir, de aquellas partes blandas de los organismos que, con el tiempo, se convertirán en kerógeno. Para este propósito, hemos confiado en dos métodos recíprocamente comprobables.

Se basa el primero en los dos isótopos estables y más frecuentes del carbono, el ^{12}C y el ^{13}C. Durante la fotosíntesis, las plantas absorben preferentemente el primero. En cambio, la incorporación del ^{12}C y ^{13}C a los esqueletos calcáreos de organismos marinos, posteriormente sedimentados en el suelo oceánico, se produce según su proporción en el entorno. Por consiguiente, la relación $^{13}C/^{12}C$ en un estrato dado de sedimento carbonatado marino conserva las concentraciones oceánicas relativas de estos isótopos en el momento en que el estrato se estaba formando. Esto, a su vez, refleja las proporciones bajo las cuales se originaron la materia orgánica y los materiales carbonatados.

Aunque existen discrepancias de tono menor, los investigadores están de acuerdo en que, durante el Fanerozoico (desde finales del Precámbrico, hace unos 570 millones de años), el cociente $^{13}C/^{12}C$ ha variado desde valores bajos, hace entre 570 y 350 millones de años, a valores altos, hace entre 350 y 250 millones de años, para pasar a valores intermedios a partir de entonces. Abraham Lerman, de la Universidad del Noroeste, y nuestro colega Garrels han introducido los datos del cociente $^{13}C/^{12}C$ en un modelo matemático que hemos incorporado a nuestro trabajo.

El segundo método con el que calculamos la tasa de enterramiento de la materia orgánica se apoya en la información recopilada por Aleksandr B. Ronov, Mikhail I. Budyko y por sus colaboradores del Instituto estatal Hidrológico de Leningrado. El grupo ha recopilado información acerca de la abundancia relativa de distintos tipos de rocas a lo largo del tiempo. Conocida la abundancia original y el contenido de carbono orgánico presente en los principales tipos de rocas —esquis-



4. MODELO INFORMATIZADO del ciclo geoquímico del carbono realizado por los autores. Este modelo permite cuantificar los procesos expuestos en la figura 3. Las rocas que se ven afectadas por la meteorización química (compuestas de dolomita, calcita y silicatos) están representadas sobre fondo violeta, mientras que el negro corresponde a la materia orgánica. Nótese que en el modelo están incluidas las reacciones en las que se ven involucrados el calcio y el magnesio. Los productos de meteorización van a parar al océano, donde la sedimentación y el enterramiento del carbonato cálcico dan como resultado la liberación de CO_2. Los flujos en los que toma parte el CO_2 se representan en verde. Las líneas relacionadas con la dolomita se han representado discontinuas, puesto que, si bien estos procesos fueron importantes en el pasado, ya no lo son.

tos y areniscas marinas, sedimentos de cuencas carboníferas y capas rojas continentales— se puede calcular la tasa de enterramiento de la materia orgánica durante los últimos 570 millones de años. Los resultados coinciden bastante bien con las tasas calculadas a través del método del $^{13}C/^{12}C$, con lo que tenemos ciertas garantías de que ambas aproximaciones son aceptables.

En nuestro esfuerzo por someter a modelo el ciclo geoquímico del carbono hubimos de calcular la tasa de liberación del dióxido de carbono en las actividades ígneas y metamórficas. A la hora de resolver ese problema espinoso, supusimos que la tasa de liberación del gas era directamente proporcional a la formación del suelo marino en cada instante. El razonamiento implicado es como sigue: la superficie total de suelo marino permanece constante; por tanto, el volumen de suelo generado a través de la tectónica de placas debe ser igual, en principio, al volumen subducido. Ahora bien, la subducción suele ir acompañada de liberación de gas; por tanto, conviene suponer que la tasa de liberación de gas es proporcional a la expansión del suelo marino.

Se trata, pues, de medir la velocidad de expansión del suelo marino. En este sentido, se han realizado múltiples estimaciones para los últimos 100 millones de años, comenzando por determinar la edad del suelo marino en una región dada para después llegar a aventurar ciertas hipótesis sobre la cuantía perdida de esa región por culpa de la subducción. Lamentablemente, las estimaciones a las que se llega por este procedimiento difieren en factores del orden de dos; de ahí que hayamos incluido en nuestro modelo diferentes fórmulas que relacionan la tasa de liberación de gases con la expansión oceánica.

El problema entraña mayor dificultad a medida que nos alejamos en el tiempo: queda muy poco suelo marino de más de 150 millones de años que no se haya subducido todavía, por lo que resulta imposible obtener una medición directa de su edad. Obviamos ese obstáculo al relacionar la variación mundial del nivel del mar con la tasa de formación de suelo marino, utilizando para ello un modelo desarrollado por Walter C. Pitman III y por sus colaboradores, del Observatorio Geológico de Lamont-Doherty. Las dorsales centro-oceánicas se ensanchan con la formación de suelo marino. El incremento de volumen de las dorsales desplaza el agua del mar, provocando una subida de nivel de la misma con respecto a los continentes. Las estimaciones realizadas para los últimos 600 millones de años se han basado, por ejemplo, en el estudio de sedimentos marinos someros. Gracias a la correlación de Pitman entre el nivel del mar y la tasa de expansión oceánica, se puede calcular la razón entre la liberación de gases en el pasado y la actualidad.

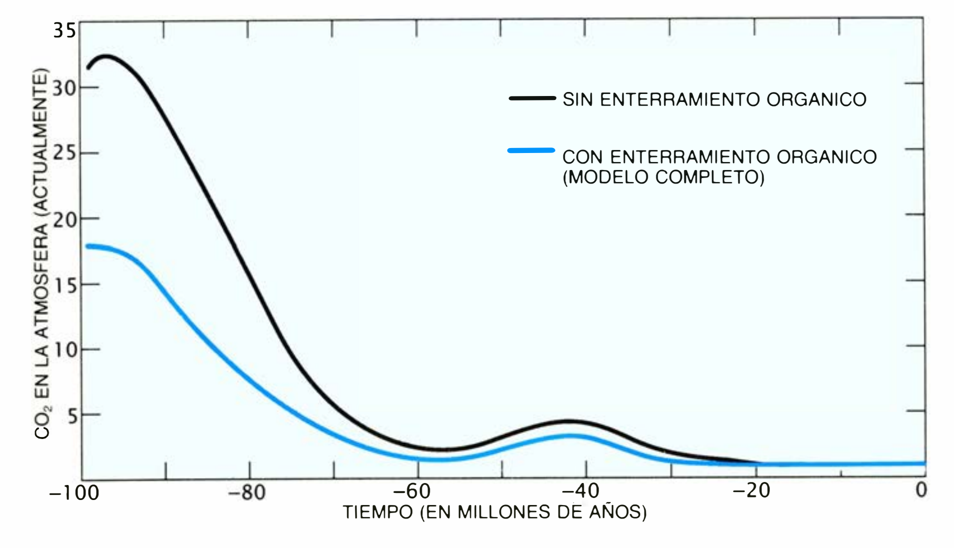
Tampoco ese planteamiento se halla exento de objeciones. El nivel del mar no sólo se ve afectado por la expansión oceánica, sino también por otros muchos procesos: partición y formación de continentes o pérdidas ingentes de agua marina durante la formación de glaciares. Estos factores deben tenerse en cuenta antes de relacionar las variaciones del nivel del mar con la tasa de expansión oceánica. Se han realizado una serie de intentos en este sentido pero, por desgracia, sólo se puede disponer de los procesos ocurridos en los últimos 150 millones de años, es decir, la cuarta parte de los 600 millones de años para los que se tienen datos sobre las variaciones del nivel del mar.

No hace falta ponderar la exigencia de mayor información para cuantificar la tasa mundial de liberación del dióxido de carbono. Hasta la fecha, lo expusimos más arriba, hemos dependido de diversas estimaciones que relacionan la superficie del suelo marino con su edad, para obtener así la tasa de liberación de gases durante los últimos 100 millones de años. En el futuro, la aparición de métodos más avanzados nos permitirá mejorar el modelo e incluir en él la producción de dióxido de carbono durante los últimos 600 millones de años.

Tal y como hemos dicho con anterioridad, suponemos que la tasa de liberación de gas guarda una relación directamente proporcional con la de formación de suelo oceánico. Esta aproximación nos permite comparar antiguos porcentajes con los actuales; para obtener tasas absolutas, es necesario fijar la constante de proporcionalidad, determinando para ello la tasa actual de liberación. En línea de principio, eso es factible si sumamos todas las fuentes de dióxido de carbono —volcanes, manantiales carbónicos y similares—, pero resultaría tedioso en el mejor de los casos, y, en el peor, casi imposible.

Más fácil resulta componer a partir de la hipótesis según la cual el nivel de dióxido de carbono atmosférico no ha sufrido bruscas fluctuaciones a lo largo del tiempo. En ese marco, la liberación volcano-metamórfica debe equilibrar el dióxido de carbono tomado de la atmósfera por la meteorización, la sedimentación de carbonatos y los demás procesos de los que hemos hablado. Las tasas de estos procesos se conocen bastante bien; la suma de los mismos debe ser igual a la tasa actual de liberación de gas.

La hipótesis de un dióxido de carbono sin fluctuaciones violentas a lo largo del tiempo es válida; por lo menos constituye una buena aproximación: todavía hay vida en la Tierra. Si la tasa de liberación de gas hubiese sido



5. CONTENIDO ATMOSFERICO DE DIOXIDO DE CARBONO en función de diversos parámetros, durante los últimos 100 millones de años en relación al nivel actual. La concentración de CO_2 se ve condicionada por la sedimentación y el enterramiento de la materia orgánica (restos blandos de materia carbonosa) en antiguos pantanos y fondos marinos. Este enterramiento resta CO_2 a la atmósfera, hecho que queda reflejado en las curvas: en la inferior está incluido el enterramiento orgánico, lo que provoca una menor cantidad de CO_2 atmosférico, mientras que en la curva superior, al no considerarse este tipo de enterramiento, resulta una mayor cantidad de CO_2 en la atmósfera. La elevación que aparece hace unos 40 millones de años refleja un incremento en la tasa de expansión oceánica, lo que lleva a un aumento de la liberación de gas.

resto de las tasas), todo el dióxido de carbono atomosférico y oceánico se hubiese agotado en 600.000 años, acarreando la desaparición del proceso de fotosíntesis. Con una tasa doble de liberación, el exceso de dióxido de carbono hubiera provocado, a consecuencia del efecto invernadero, la extinción de la vida vegetal y animal en pocos millones de años.

La necesidad de equilibrar los flujos de dióxido de carbono no significa que éste no pudiera fluctuar o no fluctuara, dentro de un arco temporal de longitud suficiente. La cantidad de dióxido de carbono en la atmósfera, en cualquier momento de la historia geológica, ha sido pequeña comparándola con la cantidad que entraba o salía de la misma; de esa guisa, pequeños desequilibrios en los flujos podían producir grandes cambios en el nivel de dióxido de carbono atmosférico. Como se verá más adelante, éste es, en realidad, el resultado más importante de nuestros cálculos: pequeños desequilibrios de los flujos entre los componentes del ciclo geoquímico del carbono han llevado a una disminución general del dióxido de carbono atmosférico en los últimos 100 millones de años. Por consiguiente, debido a una disminución del efecto invernadero, nuestro planeta se ha ido enfriando.

¿Cómo contrastar nuestros cálculos con otras observaciones independientes? ¿Cómo interpretar los resultados? No hay duda de que la Tierra gozó de una temperatura superficial media durante el Cretácico (entre los últimos 135 y 65 millones de años) más alta que en la actualidad. Esta afirmación recibe el aval de múltiples observaciones: fósiles de animales (por ejemplo caimanes) y plantas que viven en climas cálidos se han hallado en lo que fueron las regiones polares cretácicas. La composición isotópica del oxígeno encontrada en organismos marinos de zonas profundas demuestra también que las temperaturas del Cretácico fueron mayores que en la actualidad.

Eric J. Barron y sus colaboradores, del Centro Nacional de los EE.UU. para la Investigación Atmosférica, han descubierto, con la ayuda de un modelo climático de circulación general, que se pueden igualar las temperaturas que durante el Cretácico afectaron a zonas de alta latitud aumentando el nivel de dióxido de carbono atmosférico. En su modelo, incrementando la tasa de circulación oceánica, cambiando la posición de los continentes o aumentando la cantidad de radiación solar, se producía una elevación de la temperatura, pero nunca hasta los niveles del Cretácico. Se necesitaría de cuatro a ocho veces la cantidad de dióxido de carbono actual para igualar las temperaturas polares del Cretácico calculadas por paleontólogos y geoquímicos.

Tales resultados nos llevan al convencimiento de que los cambios climáticos en el pasado geológico han sido provocados, en su mayor parte, por variaciones del contenido del dióxido de carbono en la atmósfera. Esta imagen del paleoefecto invernadero fue defendida con estusiasmo por Alfred G. Fischer, de la Universidad de Princeton. Demostró que, durante los últimos 600 millones de años, existió una buena correlación entre altas temperaturas, elevaciones del nivel del mar y mayor abundancia de rocas ígneas (siendo las dos últimas indicadoras de un aumento de la liberación de dióxido de carbono). Observó que en los períodos glaciales se producían descensos del nivel del mar y menor cantidad de rocas ígneas. Fischer sugirió que la Tierra pasaba de "períodos-invernadero" a "períodos-nevera", según fuera el alcance de la actividad tectónica y la liberación de dióxido de carbono.

Con nuestro modelo informatizado hemos corroborado que el factor principal que afecta al nivel de dióxido de carbono era la tasa de liberación. Estamos de acuerdo, pues, con Fischer en que el dióxido de carbono atmosférico y el mundo del clima en general se hallan condicionados por la tectónica, por procesos que se desarrollan en las profundidades de la Tierra.

La tasa de enterramiento de materia orgánica viene en segundo lugar, por orden de importancia, en el control de la abundancia del dióxido de carbono. Dado que el carbono enterrado en el suelo marino procede de la atmósfera, las tasas de enterramiento del Cretácico, altas en relación a las actuales, tienden a rebajar el nivel de dióxido de carbono (y la temperatura) durante ese período.



6. ISLA DE WHITE, en la bahía de Plenty, Nueva Zelanda; se encuentra situada sobre la zona de subducción de Tonga-Kermadec-Nueva Zelanda, donde la placa Pacífica se desliza bajo la correspondiente de la India. En el proceso de subducción se arrastran sedimentos carbonatados a grandes profundidades, en las cuales se ven sometidos a un calentamiento intenso. Las reacciones entre carbonatos y silicatos producen dióxido de carbono que acabará finalmente por descubrir su salida a través de manantiales carbónicos o volcanes.

La meteorización de la materia orgánica, que se lleva a cabo mediante la oxidación producida por el oxígeno atmosférico, apenas si tiene algo que ver con el nivel de dióxido de carbono. Más aún; con un buen planteamiento no se exige que dependa ni de la temperatura ni de la tasa de liberación de gas. La tasa de enterramiento de la materia orgánica, independiente también de estos factores, puede calcularse para todo el Fanerozoico. Nuestros resultados muestran que la tasa de enterramiento orgánico fluctúa entre el doble y la mitad de la tasa actual; lo que se refleja en el valor de la relación $^{13}C/^{12}C$ oceánica anteriormente comentada.

De acuerdo con nuestro modelo, el

Carbonífero y el Pérmico (períodos comprendidos entre los pasados 350 y 250 millones de años) presentan las tasas más altas de enterramiento orgánico. En nuestra opinión, esto obedece a dos factores. En primer lugar, con anterioridad a estos períodos, la vida marina era la única fuente de materia orgánica y la tasa de enterramiento orgánico tuvo que ser baja. Justo antes del Carbonífero, hace unos 400 millones de años, aparecieron las plantas vasculares; se extendieron por todos los continentes y crearon una nueva fuente de materia orgánica resistente a la degradación bacteriana. Este tipo de materia (por ejemplo la lignina, parte esencial de la fibra vegetal) entró a formar parte del ciclo geoquímico del carbono una vez depositada en pantanos, lagos u océanos, incrementando con ello la tasa de enterramiento orgánico.

La segunda razón que explicaría la excesiva tasa de enterramiento orgánico durante el Carbonífero y el Pérmico sería la presencia de amplias extensiones de tierras bajas situadas por encima del nivel del mar. Por aquel entonces, la mayoría de las masas continentales se encontraban unidas, formando un único continente: Pangea. La formación de Pangea produjo una regresión marina y el descenso del nivel del mar. Tierras que habían estado bajo las aguas se encontraban ahora emergidas, y las zonas húmedas del interior se cubrieron de grandes extensiones pantanosas de agua dulce. A diferencia de los suelos de tierras altas, los pantanos protegen la materia orgánica contra la descomposición bacteriana; por tanto, una vez que la materia vegetal muerta se deposita en un pantano, se conservará, transformándose con el paso del tiempo en kerógeno y carbón. De acuerdo con las estimaciones realizadas sobre la abundancia de carbón, los períodos de mayor intervención en la formación del mismo fueron el Carbonífero y el Pérmico; esto, según nuestros cálculos, concuerda cuantitativamente con los momentos de mayor tasa de enterramiento orgánico, obtenidos a través de la relación $^{13}C/^{12}C$.

Vemos, pues, que las tasas altas de enterramiento orgánico ejercen un efecto adicional importante en la composición de la atmósfera. El enterramiento de materia orgánica representa un exceso de fotosíntesis (producción neta de oxígeno) sobre la destrucción causada por la respiración bacteriana (reducción neta de oxígeno). En consecuencia, si todos los demás factores permanecieron constantes y las tasas de enterramiento que calculamos para el Carbonífero y el Pérmico son correctas, la atmósfera en ese tiempo tuvo que ser más rica en oxígeno que en ningún otro momento de la historia geológica.

Si consideramos todos y cada uno de los razonamientos expuestos hasta el momento, vemos que los cálculos obtenidos a partir de nuestro modelo nos han permitido ofrecer una explicación provisional de las condiciones climáticas de la Tierra en un pasado lejano. Nuestra aportación principal sería haber puesto de manifiesto que, a lo largo de millones de años, la lenta fluctuación natural de dióxido de carbono atmosférico puede equipararse o incluso superar, los cambios mucho más rápidos vaticinados como consecuencia de las actividades humanas o los causados por el ciclo biológico del carbono. Igualmente, el tener en cuenta que el dióxido de carbono ha ejercido una influencia primordial sobre la temperatura global del pasado da una idea de lo que puede esperarse en el futuro, si el hombre continúa la quema de combustibles fósiles al ritmo actual.

Pero, por encima de todo, al crear un modelo del ciclo geoquímico del carbono, nos propusimos destacar cuán poco se conoce sobre las tasas de importantes procesos globales y cómo procesos sin relación aparente (los tectónicos con los climáticos) se encuentran estrechamente ligados. Realizar un modelo de la historia climática es una actividad multidisciplinar y, como tal, se apoya en los resultados de la geoquímica, geofísica, biología, edafología, paleontología, meteorología, climatología, oceanografía y astronomía. El logro de mayores progresos en este campo requerirá la continua colaboración de científicos de estas y otras disciplinas.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE CARBONATE-SILICATE GEOCHEMICAL CYCLE AND ITS EFFECT ON ATMOSPHERIC CARBON DIOXIDE OVER THE PAST 100 MILLION YEARS. Robert A. Berner, Antonio C. Lasaga y Robert M. Garrels en *American Journal of Science*, vol. 283, n.º 7, págs. 641-683; septiembre de 1983.

THE CHEMICAL EVOLUTION OF THE ATMOSPHERE AND OCEANS. H. D. Holland. Princeton University Press, 1984.

THE TWO PHANEROZOIC SUPERCYCLES. A. G. Fischer en *Catastrophes and Earth History*, editado por W. A. Berggren y J. A. Van Couvering. Princeton University Press, 1984.

ATMOSPHERIC CARBON DIOXIDE AND THE GLOBAL CARBON CYCLE. Editado por J. R. Trabalka. U. S. Government Printing Office, 1985.

Biología de las obsesiones y las compulsiones

Los avances en farmacología y en las técnicas de formación de imágenes para el diagnóstico de enfermedades cerebrales abogan por una base biológica de las obsesiones y compulsiones graves

Judith L. Rapoport

Sergei ha cumplido los 17 años. Cursaba su bachillerato con toda normalidad hasta que, hace sólo 12 meses escasos, quien parecía un adolescente más, dotado de talento e interesado por mil cosas, se tornó, de repente, casi de la noche a la mañana, una persona solitaria, retraído de la vida social por sus desequilibrios psicológicos. No podía parar de lavarse. Dominado por la idea de que estaba sucio –a pesar de la evidencia contraria de sus sentidos– comenzó a emplear más y más tiempo en lavarse a sí mismo de una suciedad imaginaria. Al principio, sus abluciones rituales se limitaban a las tardes y a los fines de semana; pudo permanecer en el colegio mientras las mantenía controladas. Muy pronto, sin embargo, empezaron a consumir todo su tiempo, obligándole a abandonar la escuela, víctima de su incapacidad de sentirse suficientemente limpio.

La enfermedad de Sergei se denomina desorden obsesivo-compulsivo, o DOC. Considerado antaño un problema muy poco frecuente, se sabe que afecta quizás al 2 por ciento de la población estadounidense. Los DOC son reacios al consejo familiar, la psicoterapia y la mayoría de los fármacos para el tratamiento de la ansiedad y la depresión. Estudios recientes llevados a cabo en el Instituto Nacional de Salud Mental con mis colegas han puesto de manifiesto que los DOC responden a ciertos medicamentos antidepresivos nuevos. La capacidad de estas medicinas para reducir el comportamiento obsesivo-compulsivo difiere de su efecto sobre la depresión. Esto último nos revela que los DOC no son alteraciones del estado de ánimo, aunque sí componen un síndrome específico de origen biológico; y si bien queda mucho por avanzar en el conocimiento detallado de los DOC, estamos asistiendo al rápido desarrollo de un modelo biológico nuevo donde encuentran explicación.

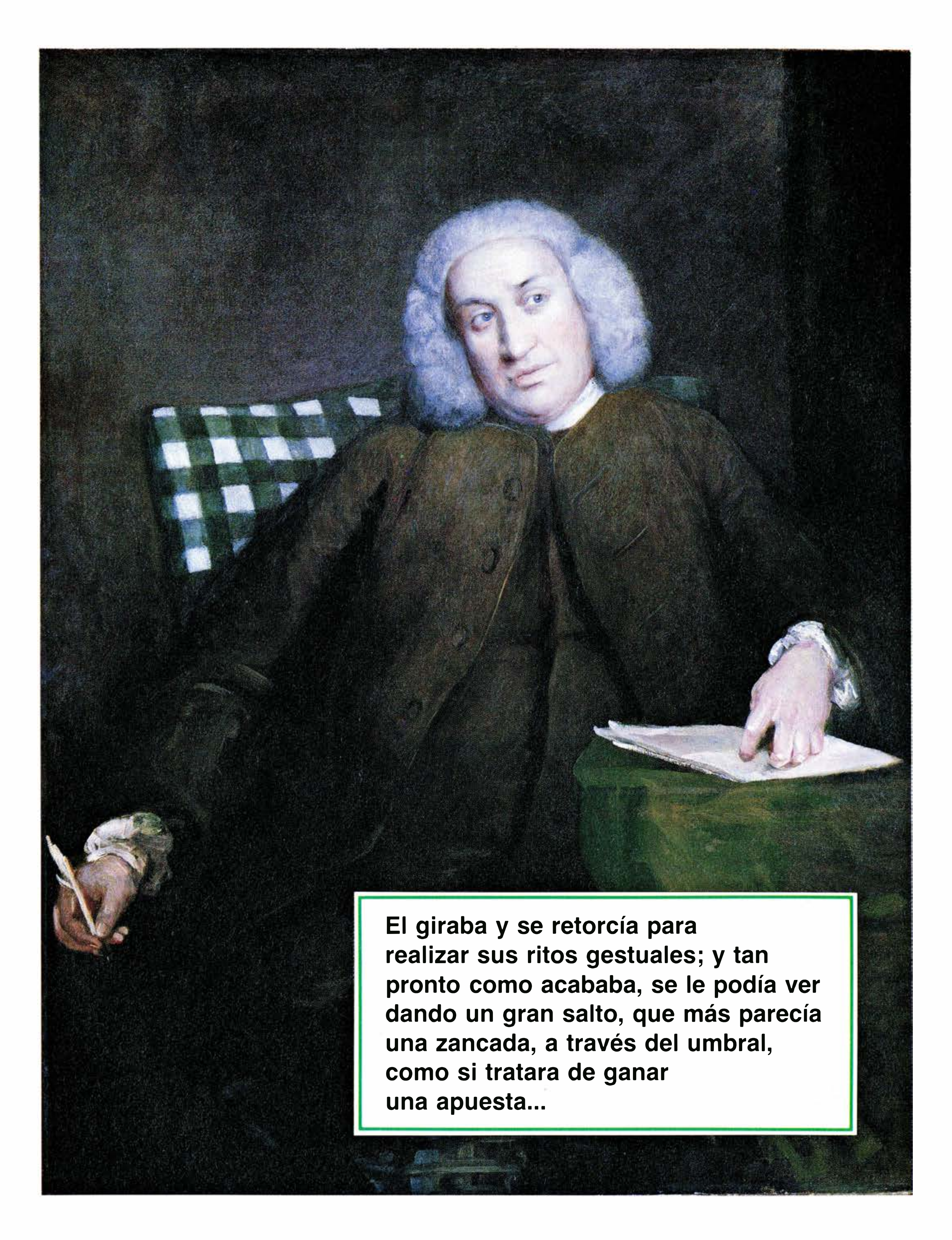
Un elemento fundamental del modelo en cuestión estriba en la idea según la cual ciertas «subrutinas» de comportamiento relacionadas con el aseo y la territorialidad quedaron programadas en el cerebro humano durante el curso de la evolución. Por lo común, la observación de los sentidos (estado de limpieza personal o que el horno esté apagado) basta para mantener suprimidas estas subrutinas. Pero si no funcionan correctamente los centros cerebrales superiores, se pueden reproducir repetitivamente las subrutinas y convertir a los pacientes de DOC en sus propias víctimas, incapaces de parar de lavarse o de cesar en la comprobación reiterada de la llave del gas, sin perder, además, conciencia de lo absurdo de su comportamiento. La nueva biología de las obsesiones y de las compulsiones representa un gran paso adelante en su desentrañamiento; asimismo, disponer de nuevos fármacos con actividad anti-DOC supone un avance importante en el dominio de su terapéutica.

Los términos obsesivo y compulsivo forman parte del lenguaje ordinario. La gente dice a menudo «es una persona compulsiva» para dar a entender que se trata de un pelmazo algo nervioso. Se dice también «está obsesionada por él», cuando ella bebe los vientos por el amado. No damos ese sentido aquí a uno y otro vocablo. La enfermedad obsesivo-compulsiva constituye un problema psiquiátrico crónico y grave. Se manifiesta mediante obsesiones (impulsos, pensamientos o ideas recurrentes y persistentes, que se experimentan, al menos inicialmente, como de carácter intrusista y carentes de sentido) o compulsiones (comportamientos repetitivos e intencionados –percibidos como innecesarios– acometidos en respuesta a una obsesión, de acuerdo con ciertas reglas o de una forma estereotipada).

En estos procesos los DOC se caracterizan por la necesidad apremiante de lavarse, de comprobar las puertas (para asegurarse de que están cerradas) o los interruptores (para convencerse de que estén apagados) o contar repetitivamente; se definen también por la presencia de pensamientos de carácter intrusista (frecuentemente de comportamientos peligrosos o inaceptables). La diferencia entre los DOC y las formas más suaves de compulsión observadas en personas sanas reside en su intensidad y tiempo: en los primeros, estos comportamientos se han acentuado tanto y ocupan tanta porción de su tiempo que interfieren en la vida del paciente en un grado considerable, como en el ejemplo de Sergei.

Sorprende, en los pacientes de DOC, la limitación de su mal: en otras áreas de la vida son personas bastante razonables. Más aún, a pesar de saber que sus comportamientos obsesivo-compulsivos son irracionales, no pueden hacer gran cosa para controlarse a sí mismos. Sufren mucho con ello. Cuando los síntomas son severos, convierten al paciente en personaje ridículo ante los demás; tal le ocurría a Samuel John-

JUDITH L. RAPOPORT dirige la división de psiquiatría infantil del Instituto Nacional de Salud Mental de los Estados Unidos. Estudió psicología en el Colegio Swarthmore y obtuvo el doctorado en medicina por la Universidad de Harvard. Tras ejercer las prácticas en psiquiatría infantil y en psiquiatría general, realizó estudios de postgrado en psicología experimental. Su investigación se ha centrado en aspectos biológicos de la psiquiatría infantil.



1. SAMUEL JOHSON, crítico, escritor y lexicógrafo inglés del siglo XVIII, mostraba diversos síntomas obsesivos y compulsivos. Este retrato fue pintado por Sir Joshua Reynolds alrededor de 1756. Inserta en el cuadro hay una descripción hecha por un contemporáneo acerca del curioso comportamiento de Johson al pasar por una puerta. En sus formas más severas, las obsesiones y compulsiones constituyen los denominados desórdenes obsesivo-compulsivos (DOC).

son, enfermo famoso, quien debía dar un espectáculo deplorable a sus acompañantes con sus movimientos extraños de manos (a modo de ritual) antes de saltar por encima del umbral de las puertas. La víctima de los DOC puede transformarse incluso en un sucio ermitaño, como le pasó a Howard Hughes. (Aunque el sino de Hughes parece paradójico, a tenor de las compulsiones de pulcritud de los enfermos con DOC, pudiera ser, si vale la explicación, que sus ceremonias de limpieza le absorbieran tanto tiempo que no pudiera completarlas adecuadamente y, por ende, acabara paralizado psicológicamente.)

Mi formación médica y psiquiátrica no me había familiarizado con los pacientes de DOC. Y no por la escasa incidencia de casos, sino porque esos enfermos raramente buscan ayuda psiquiátrica. En mi dedicación a la psiquiatría infantil me intrigaba el número insignificante de pacientes, que, además, parecían idénticos a los enfermos adultos. Es insólito que un mismo desequilibrio psiquiátrico aparezca, de forma idéntica, en niños y adultos; lo habitual en cualquier enfermedad es que ésta se presente con mayor frecuencia en un momento específico del ciclo vital (como la esquizofrenia, por ejemplo, que se da preferentemente en la adolescencia tardía).

OBSESIONES	SINTOMAS OBSERVADOS EN LA ENTREVISTA INICIAL	
	NUMERO	PORCENTAJE
Relativas a la suciedad, gérmenes o toxinas ambientales	28	(40)
Algo terrible que está sucediendo (fuego, muerte o enfermedad de uno mismo o de un ser querido)	17	(24)
Simetría, orden o exactitud	12	(17)
Escrúpulos (obsesiones religiosas)	9	(13)
Preocupación o disgusto por desechos o secreciones corporales (orina, heces, saliva)	6	(8)
Números afortunados o desafortunados	6	(8)
Pensamientos, fantasías o impulsos sexuales que estén prohibidos o sean agresivos o perversos	3	(4)
Miedo a hacer daño a los demás o a uno mismo	3	(4)
Preocupación por la limpieza de la casa	2	(3)
Sonidos, palabras o música de carácter intrusista y sin sentido	1	(1)

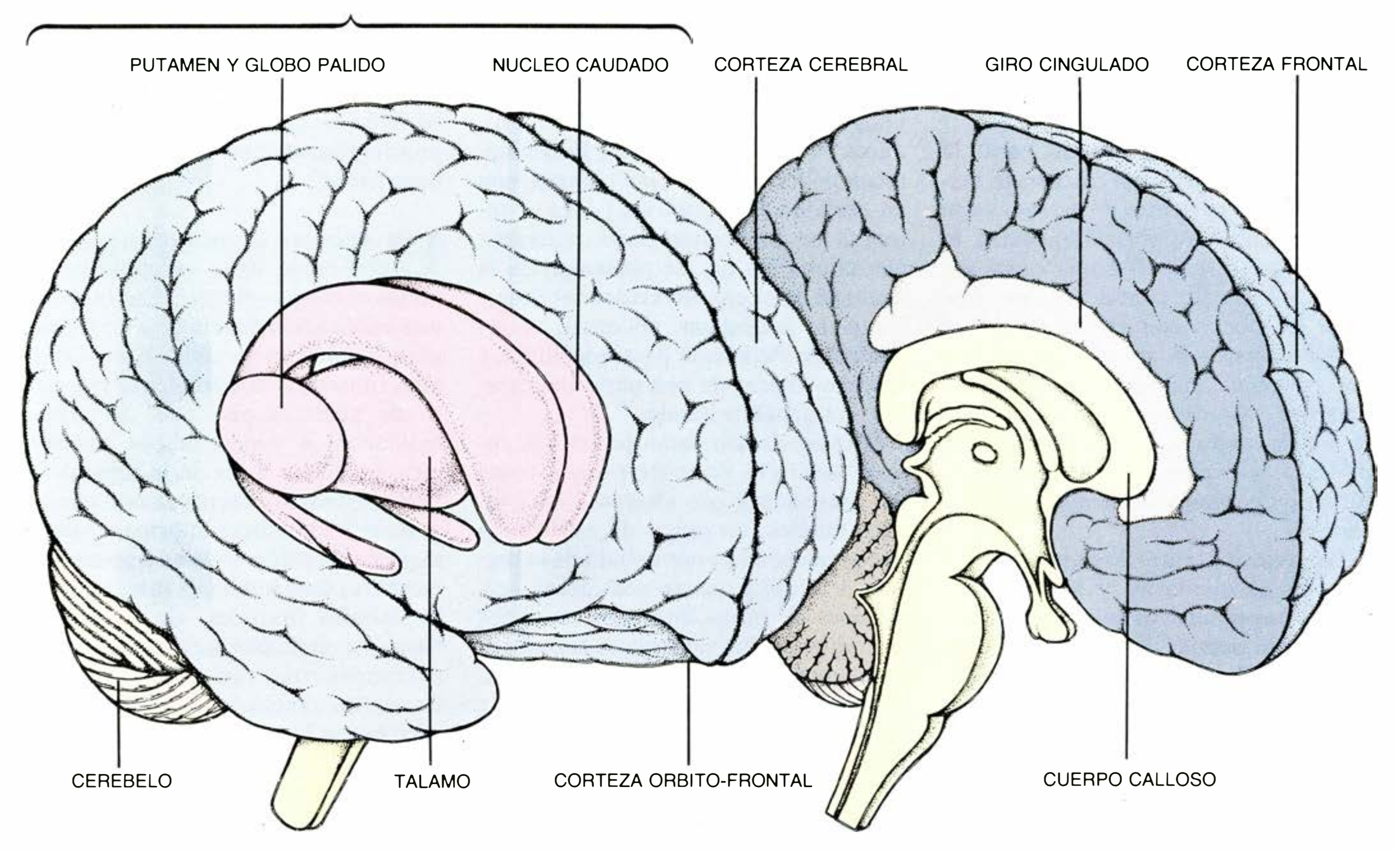
COMPULSIONES	SINTOMAS OBSERVADOS EN LA ENTREVISTA INICIAL	
	NUMERO	PORCENTAJE
Lavarse las manos, ducharse, bañarse, limpiarse los dientes o asearse de forma excesiva o ritualizada	60	(85)
Rituales repetitivos (ir y volver a través de una puerta, sentarse y levantarse en una silla)	36	(51)
Comprobación excesiva (puertas, cerraduras, hornos, instrumentos, frenos de seguridad, mapas de ruta, tareas escolares)	32	(46)
Rituales para evitar el contagio	16	(23)
Tacto	14	(20)
Medidas para prevenir el daño propio o a los demás	11	(16)
Orden u organización	12	(17)
Contar	13	(18)
Acumular o coleccionar rituales	8	(11)
Rituales de limpieza del hogar o de objetos inanimados	4	(6)
Miscelánea de rituales (tales como escribir, moverse o hablar)	18	(26)

2. TABLA DE SINTOMAS que indica las obsesiones y compulsiones más frecuentes entre un grupo de 70 niños y adolescentes que fueron diagnosticados de DOC en el Instituto Nacional de Salud Mental. Las proporciones totales superan el 100 por ciento porque muchos pacientes tenían más de un síntoma.

Durante el transcurso de nuestras investigaciones he podido ver, sin embargo, niños cuyos raros actos repetitivos comienzan ya a los tres años: caminar en círculo, contar o dar golpecitos cierto número de veces; son actos que se sienten inclinados a llevar a cabo a su pesar. Los niños tienen su propia explicación de por qué realizan actos tan extraños. Así, a los siete años Esteban vio un programa de televisión en el que unos marcianos amistosos contactaban con seres humanos mediante la inserción de extraños pensamientos en sus cabezas. Sobre la base de este programa, Esteban desarrolló su compulsión haciendo todo en secuencias de cuatro, prueba de que los marcianos le habían escogido a él como su «hombre contacto» en la Tierra.

Después de dos estériles años del ritual de las cuentas, que no resultaron en ningún tipo de contacto, Esteban olvidó la explicación anterior. Pero no renunció a seguir contando. Los pacientes de DOC no suelen abandonar sus comportamientos rituales si no siguen un tratamiento médico, a pesar de reconocer el carácter anómalo de su conducta. A menudo, sin embargo, se asiste a un agravamiento progresivo de los síntomas: desde el contar en la infancia hasta rituales de lavado en la adolescencia y pensamientos obsesivos en la primera edad adulta. De una tercera parte a la mitad de los enfermos con DOC comienzan a comportarse así en la infancia o en la adolescencia. Quizás en parte porque entienden que sus rituales y pensamientos carecen de sentido, los pacientes de DOC pueden pasar buena parte de su vida ocultándolos. Simulan un estado de normalidad el máximo tiempo posible limitando sus comportamientos rituales a las horas de intimidad y evitando las situaciones de la vida social en que sus compulsiones queden al descubierto. Logran disimular, durante años, los síntomas; sólo buscan ayuda cuando no pueden controlarlos por más tiempo, porque les impide ir a la escuela, al trabajo o cumplir con sus obligaciones sociales.

Debido a esta fase de encubrimiento, creyóse en un principio que existían pocos pacientes de DOC. Cuando mis colegas y yo iniciamos los ensayos clínicos con medicamentos en el Instituto Nacional de Salud Mental, no sabíamos si íbamos a encontrar número suficiente de individuos para realizar el estudio. Estas investigaciones comenzaron a mediados de los años setenta, estimuladas por informes que provenían de España, Inglaterra y Suecia, y que señalaban que un nuevo fármaco, la clo-



3. NEUROANATOMIA DE LOS GANGLIOS BASALES del cerebro humano. Los ganglios basales constan de varias estructuras, entre ellas el núcleo caudado, el putamen y el globo pálido, los cuales yacen por debajo de la corteza cerebral. Los ganglios basales se hallan conectados con el lóbulo frontal por vías diversas; una de ellas está contenida en el giro cingulado. Ciertas alteraciones en este circuito cerebral pueden ser la causa de los síntomas de los DOC.

rimipramina (CMI), clasificado entre los antidepresivos, ejercía una actividad antiobsesiva específica. Por entonces, veíamos con escepticismo que algún fármaco ejerciera un efecto específico anti-DOC, sobre todo si guardaba relación química con los antidepresivos; la clorimipramina era un caso típico.

Transcurrida ya más de una década, el panorama ha cambiado. En primer lugar, sabemos que la CMI puede mejorar los síntomas obsesivo-compulsivos. Segundo, como resultado de la publicidad que merecieron nuestros trabajos, tenemos ahora cientos de pacientes en solicitud de tratamiento. Es más, la atención prestada a estos trastornos ha promovido estudios epidemiológicos detallados que muestran que los DOC son mucho más frecuentes de lo que en un principio se pensó. Su incidencia se midió recientemente en cinco comunidades de los Estados Unidos: más de 180.000 personas fueron entrevistadas en sus hogares en el marco del Programa del Area de Captación Epidemiológica del Instituto Nacional de Salud Mental. La incidencia general de DOC osciló entre el 1,9 y el 3,3 por ciento en las cinco comunidades analizadas: una tasa entre 25 y 60 veces más alta que las estimadas con anterioridad. Las tasas de incidencia, en el estudio del Area de Captación, correspondían a tasas de esperanza vital, es decir, la tasa que cabría esperar en un grupo de iguales cronológicos al final de su arco vital. Esa tasa está confirmada por un estudio de más de 5000 alumnos de bachillerato llevado a cabo por mis colegas y yo en colaboración con Agnes Whitaker y su equipo de la Facultad de Medicina de la Universidad de Columbia. Sobre este grupo más joven, la incidencia acumulativa de DOC osciló alrededor del 1 por ciento. Si los dos trabajos son correctos, habrá de cuatro a seis millones de personas en los Estados Unidos que sufren este trastorno.

Apreciaremos en sus justas dimensiones el problema si nos fijamos en el sufrimiento que atormenta a tanta gente. Incluso para quienes no han de abandonar escuela o trabajo, los DOC significan una vida de preocupación y aislamiento. Conocen una mayor probabilidad de divorciarse o quedar solteros, para evitar, quizás, el descubrimiento de sus rituales privados. Los estudios de seguimiento de las personas que han recibido tratamiento clínico demuestran que el desequilibrio es crónico y recurrente: al menos el 50 por ciento de los tratados con psicoterapia o farmacoterapia tradicional continúan sufriendo la enfermedad entre siete y veinte años después de acabar el tratamiento.

La experiencia que mis colegas y yo hemos adquirido desde que comenzamos los trabajos en 1975 nos ha conducido hacia una perspectiva etológica de los DOC. Llámase etología al estudio científico del comportamiento animal. La disciplina debe muchísimo a Konrad Lorenz, quien describió la construcción de los nidos, los rituales de aseo, el cortejo y la defensa en animales jóvenes, principalmente en las aves. Estos comportamientos aparecían sin modelos de aprendizaje. Lorenz formuló entonces la hipótesis de que habían quedado imbricados en los circuitos cerebrales. Muchas de las conductas de los pacientes con DOC parecen recordar a los modelos de acción predeterminada descritos por Lorenz. Es obvio que los estímulos físicos y culturales cuentan en los síntomas de un paciente, pero el aspecto ritualizado del comportamiento y su sorprendente uniformidad –junto con la identidad de síntomas en niños y adultos– sugieren una preprogramación biológica.

Además de la uniformidad de los

comportamientos, presentaban las obsesiones y las compulsiones otros rasgos que nos movieron a reconocer una base biológica para los DOC; esos fundamentos, sugeridos ya por otros investigadores, se vieron reforzados por los nuevos hallazgos. Por una parte, la enfermedad ocurre con frecuencia mayor entre los parientes de personas con DOC que entre la población general, lo que induce a sospechar una causa genética. Además, ciertas asociaciones entre los DOC y alteraciones de origen nervioso parecen apuntar hacia una perturbación anatómica del sistema nervioso. Alrededor del 20 por ciento de los pacientes muestran también tics motores: movimientos involuntarios en forma de parpadeo o de muecas faciales.

La conexión entre los movimientos motores involuntarios y los síntomas obsesivo-compulsivos se conoce desde hace algún tiempo. En el año 1896, Sir William Osler, que a la sazón era director médico del Hospital Johns Hopkins, describió un caso de una niña de siete años de edad que sufría de un síndrome caracterizado por una compulsión de contar de una forma muy rara y de movimientos coreiformes. (Corea es un término general que se aplica a unos movimientos reflejos que se producen de forma rápida, que, si bien parecen gobernados por la voluntad, son en realidad involuntarios.) Desde entonces se ha comprobado reiteradamente que los DOC se presentan de la mano de otras enfermedades nerviosas: corea de Sydenham, epilepsia, enfermedad de Parkinson postencefalítica y lesiones tóxicas de una parte del cerebro, los ganglios basales.

Esta asociación llama poderosamente la atención, en parte porque todas las alteraciones que afectan a los ganglios basales, un grupo de estructuras que se encuentran por debajo de la corteza cerebral y que se consideran «estaciones de paso» entre los estímulos aferentes de tipo sensorial y las correspondientes respuestas de tipo motor o cognoscitivo. ¿Cabría la posibilidad de que, en los pacientes obsesivo-compulsivos, existiera una alteración de los puntos intermedios de paso que hubiera cortocircuitado el sistema que pone el estímulo sensorial en conexión con la respuesta de comportamiento, liberando así unos patrones de conducta preprogramada que se encontraban almacenados?

En nuestras investigaciones hemos observado líneas de pruebas, diversas e independientes, que muestran una implicación del circuito de los ganglios basales en los DOC. Como ya he mencionado, alrededor del 20 por ciento de nuestros pacientes desarrollan movimientos espasmódicos coreiformes, parecidos a los de la paciente de Osler; asimismo, las pruebas al uso que permiten identificar funciones neurológicas específicas revelan que nuestros pacientes tienen déficits funcionales en los lóbulos frontales, en los ganglios basales o en ambos lugares a la vez. No conformes con estos datos provisionales hemos realizado tres trabajos que corroboran la participación de estas regiones cerebrales en los trastornos obsesivo-compulsivos.

Con Jay Luxenberg y sus colaboradores, del Instituto Nacional del Envejecimiento, abordamos un estudio en el que se comparaban las imágenes de tomografía axial computerizada (TAC) cerebral de pacientes con DOC con las de un grupo control, libre de la enfermedad. Nos interesaba, en particular, el volumen del núcleo caudado, una de las estructuras que componen los ganglios basales; nuestros pacientes poseían un núcleo caudado menor.

Un segundo estudio aprovechó un «experimento de la naturaleza» que desgraciadamente estaba afectando a muchos adolescentes. Se asistía a un rebrote de la fiebre reumática en algunas zonas de los Estados Unidos. La fiebre reumática es una enfermedad inflamatoria crónica del corazón y de las articulaciones que se desarrolla algunas veces después de ciertas infecciones estreptococales. Se cifra en un 20 por ciento el número de pacientes con fiebre reumática que desarrollan también corea de Sydenham, como resultado probable de una respuesta autoinmune contra los ganglios basales, que podría acabar interesando ese lugar.

Mis colegas y yo llevamos a cabo un trabajo de investigación sobre 23 pacientes que sufrían de corea de Sydenham y sobre 14 pacientes que tenían fiebre reumática, aunque no habían desarrollado corea (todos los casos que pudieron localizar los cinco Departamentos de Pediatría que colaboraban en el trabajo). En las evaluaciones

4. IMAGENES CON TOMOGRAFIA POR EMISION DE POSITRONES (TEP) que nos revelan las diferencias metabólicas entre los cerebros de pacientes con DOC (*arriba*) y los controles normales (*abajo*). En estas imágenes con TEP, el color rojo corresponde al más alto nivel de actividad metabólica y el azul al nivel más bajo. Los pacientes con DOC presentan niveles elevados en diversas áreas, incluidos los ganglios basales.

«ciegas» (en las cuales el entrevistador no conoce el diagnóstico médico), los resultados para síntomas obsesivos fueron significativamente mayores entre los pacientes que sufrían corea de Sydenham. Más aún, tres pacientes de corea –aunque sin fiebre reumática– se ajustaban completamente a todos nuestros criterios diagnósticos para los DOC en su máxima manifestación. Este hallazgo sugiere de nuevo que el DOC, al menos en algunos pacientes, se debe a una disfunción de los ganglios basales. El tercer estudio lo acometió Susan Swedo en colaboración con Mark Shapiro y Cheryl L. Grady, del Instituto Nacional del Envejecimiento. Compararon pacientes obsesivo-compulsivos con controles normales mediante tomografía por emisión de positrones (TEP). Los cortes obtenidos mediante la TEP proporcionan imágenes cerebrales gracias a las cuales puede medirse la actividad metabólica por técnicas no invasivas en sujetos en reposo. El trabajo sacó a la luz que los pacientes con DOC poseían unos niveles más elevados del metabolismo glucídico en un área del lóbulo frontal y en el cíngulo, que es la región anatómica que conecta el lóbulo frontal con los ganglios basales. Estos resultados confirman otros obtenidos con anterioridad por Lewie Baxter y sus colaboradores, de la facultad de medicina, de la Universidad de California en los Angeles; en ambos estudios, la potenciación del metabolismo de la glucosa estaba correlacionada con las medidas de severidad del DOC.

Las pruebas recientemente acumuladas apuntalan la probabilidad de que los síntomas obsesivo-compulsivos, al menos en sus formas más severas, tengan una base biológica característica. Aunque el mecanismo preciso por el que se generan los síntomas está todavía por descubrir, hay, según expuse, indicios acerca de cuáles son las regiones cerebrales implicadas. Al mismo tiempo que se avanzaba en el conocimiento de las bases de la enfermedad, se registraron también importantes progresos en el terreno de la terapéutica.

Los pacientes de DOC pueden recibir dos tipos de tratamiento, muy diferentes entre sí. Consiste el primero en la terapia del comportamiento que conlleva una exposición repetida al estímulo que desencadena los actos rituales. Si un paciente sufre, por ejemplo, una compulsión que le induce a lavarse las manos 20 o 30 veces al día, sus manos pueden ser ensuciadas de forma deliberada y se le evita luego que se las lave. A pesar de la crueldad aparente de dicho procedimiento, se ha comprobado que resulta eficaz en casos severos donde han fallado las formas tradicionales de psicoterapia. Isaac Marks, del Hospital Maudsley de Londres, y Edna Foa, de la Facultad de Medicina de Pennsylvania, entre otros expertos, han aportado documentación relativa a tal mejoría y han demostrado que la exposición a esa situación temida es decisiva para la recuperación.



5. HOWARD HUGHES fue una víctima de DOC en el siglo XX. A lo largo de su vida estuvo preocupado por la suciedad y por los gérmenes, preocupación que le indujo a tomar medidas precautorias de tipo ritual. Hacia el final de su existencia se tornó cada vez más solitario, sucio y desaseado. En opinión de la autora, los rituales de Hughes le consumían tanto tiempo que no podía llevarlos a cabo; cuando le fue imposible completar todas sus precauciones rituales, se convirtió en un ermitaño. (Cortesía de The Bettmann Archive.)

A primera vista, podría parecer contradictorio afirmar a la vez que los DOC poseen una fuerte base biológica y que el condicionamiento de la conducta resulta eficaz para su remisión. Pero se trata de mero espejismo. Los etólogos han demostrado que muchas pautas prefijadas de acción en los animales, que se entroncan en parte con la información grabada en sus centros cerebrales, pueden silenciarse mediante el entrenamiento continuado. Más aún; por ser el cerebro un órgano biológico y un receptor de aferencias sensoriales y psicológicas, podemos esperar en buena lógica que causas estrictamente psicológicas ejerzan efectos biológicos.

La terapia del comportamiento parece ser más eficaz en las compulsiones que en las obsesiones, generadoras éstas de menos signos externos. Por otra parte, el nuevo tratamiento medicamentoso para estos trastornos parece mirar ambas por igual: obsesiones y compulsiones. Tres medicamentos se han mostrado eficaces contra los DOC y son, con la CMI, la fluvoxamina y la fluoxetina. Todos ellos se adscribieron, en un principio, entre los antidepresivos. La propia CMI difiere en un sólo átomo de cloro de otro antidepresivo clásico, la desipramina (DMI).

Pudiera pensarse que los efectos antiobsesivos de estos nuevos agentes deriven de su capacidad aliviadora de la depresión, pero este no parece que sea el caso. La mayoría de los antidepresivos no sirven para curar los síntomas obsesivos y compulsivos. La mejora observada entre nuestros pacientes durante el tratamiento no depende de que se hallen o no deprimidos; parece ser una consecuencia clínica independiente. Puede afirmarse, pues, que se ha desarrollado un nuevo tratamiento médico para los DOC.

De los tres nuevos fármacos, la CMI ha recibido la mayor atención. En un trabajo reciente, un grupo de mi equipo dirigido por Henrietta Leonard ha comparado los efectos anti-DOC de la CMI y de la DMI. Quince días después de administrárseles se les prescribió a dos grupos de pacientes la nueva medicina CMI o el antidepresivo DMI durante cinco semanas en ambos casos. Al final de ese período, se cambiaron las recetas: los miembros de un grupo recibieron la medicina antes tomada por el otro, en igual período. Se llegó a resultados sorprendentes: los pacientes mejoraban con CMI y recaían con DMI. Los que tomaron primero DMI mejoraron sólo después de recibir el nuevo fármaco CMI.

Hasta la fecha se han publicado 14 estudios a doble ciego que demuestran la eficacia antiobsesiva de la CMI. A raíz de esas investigaciones,

ANTIDEPRESIVOS TRICICLICOS

FARMACOS ANTI-DOC

$CH_2-CH_2-CH_2-N(CH_3)(H)$

DESIPRAMINA (DMI)

$CH_2-CH_2-CH_2-N(CH_3)(CH_3)$, Cl

CLOMIPRAMINA (CMI)

$CH_2-CH_2-CH_2-N(CH_3)(CH_3)$

IMIPRAMINA

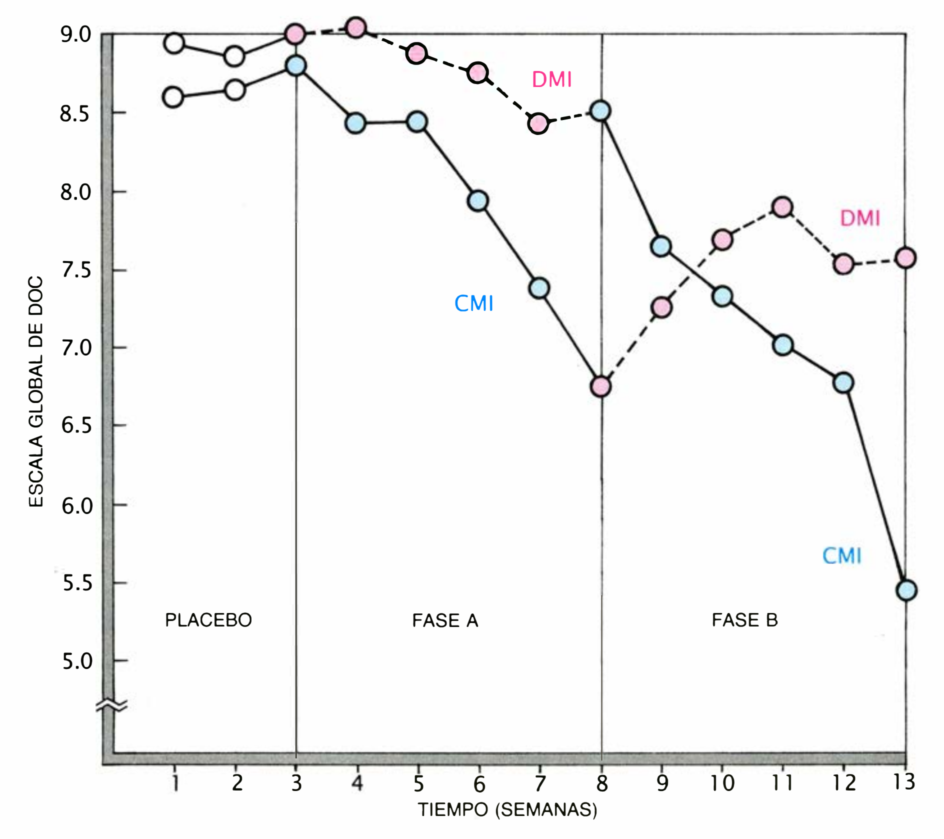
CF_3, $O-CH-CH_2-CH_2-N(CH_3)(H)$

FLUOXETINA

F_3C, $C\cdot CH_2\cdot CH_2\cdot CH_2\cdot CH_2\cdot O\cdot CH_3$, N, $O-CH_2-CH_2-N(H)(H)$

FLUVOXAMINA

6. FARMACOS ANTI-DOC, clasificados antaño entre los antidepresivos. A la izquierda se ofrecen las estructuras químicas de dos antidepresivos tricíclicos convencionales: la imipramina y la desimipramina (DMI). Se esquematizan, a la derecha, tres medicinas nuevas de demostrada eficacia en el tratamiento de los síntomas obsesivo-compulsivos: clorimipramina o clomipramina, fluoxetina y fluvoxamina. La molécula de CMI difiere de DMI en un átomo de cloro, pero sus efectos son bien dispares.



7. ESTUDIO CRUZADO realizado por la autora comparando DMI con CMI en el tratamiento de los DOC. Se les dio cada una de las dos medicinas a dos grupos de tratamiento diferentes, cruzando el fármaco al cabo de un tiempo: se substituía uno por otro. La clorimipramina se muestra eficaz en el tratamiento de los síntomas obsesivo-compulsivos; la dosipramina, por su parte, parece tener un efecto bastante pequeño.

además de los trabajos multicéntricos llevados a cabo por CIBA, la empresa que comercializa el producto, ésta ha recibido autorización del ente administrativo competente para suministrar la medicina a los enfermos con un permiso especial. (Sólo cuatro fármacos han gozado de ese privilegio estatal, siendo el primero de ellos la AZT, prescrita contra el SIDA.) ¿A qué se debe la eficacia de la CMI? La respuesta no está tan clara como su efecto. La eficacia de la CMI (junto con la reconocida a la fluvoxamina y la fluoxetina) guarda relación quizá con la fisiología de la serotonina, un neurotransmisor. El mecanismo de acción de este neurotransmisor en el comportamiento humano, todavía por conocer, interviene, se ha observado, en el suicidio, el apetito y el control de la agresión, entre otros. Las neuronas que responden a la serotonina gozan de amplia distribución por el cerebro; existen en los lóbulos frontales y están particularmente concentradas en los ganglios basales.

Lo mismo que ocurre con otros neurotransmisores, la serotonina se libera en la sinapsis (hiato entre dos neuronas) para sacarla luego de allí en el proceso de reingesta («reuptake»), antes de que la célula presináptica se torne de nuevo excitada. La CMI, la fluvoxamina y la fluoxetina bloquean, todas, la reingesta de serotonina en la sinapsis; y, según sugiere Dennis L. Murphy en sus investigaciones, ésta podría ser la razón por la que dichos fármacos poseen tal eficacia contra los síntomas obsesivo-compulsivos. La serotonina y sus productos metabólicos se detectan en la sangre y en el líquido cefalorraquídeo; pero nadie ha demostrado aún que los pacientes con DOC presenten niveles anormales de los mismos en dichos fluidos. La prueba de la intervención de la serotonina en la enfermedad es de tipo indirecto. Se sabe también que la CMI afecta a la acción de otros neurotransmisores (en particular de la dopamina); por otro lado, se desconoce el mecanismo de acción de la CMI.

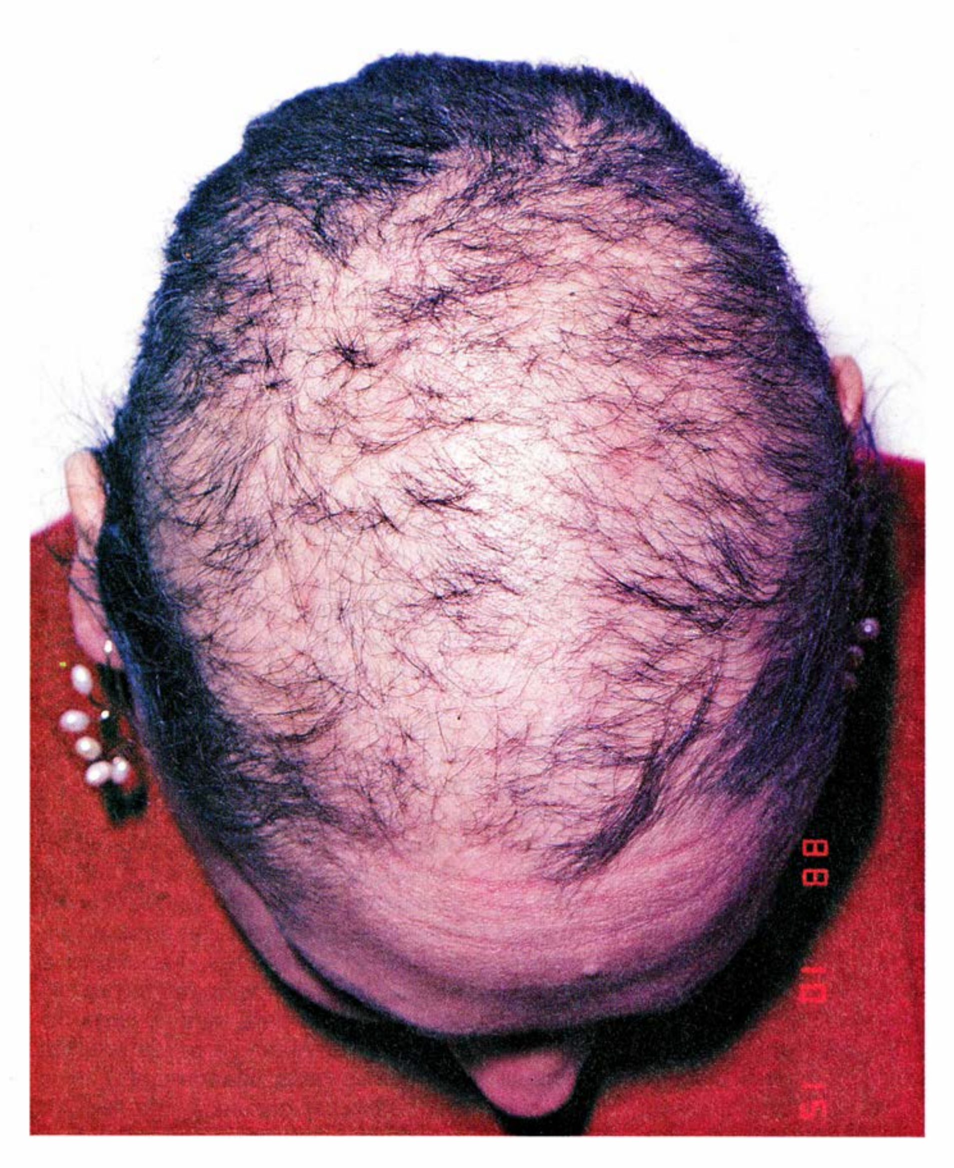
A pesar de la existencia de tales lagunas, cuanto sabemos es suficiente para avanzar una hipótesis sobre las posibles bases biológicas de los DOC. Parece probable que los patrones de comportamiento latentes que están almacenados en los ganglios basales se activen ante anomalías funcionales de áreas inferiores del lóbulo frontal. El impulso desencadenante es transportado a los ganglios basales por las vías mediadas por serotonina. El tratamiento médico adecuado podría alterar el papel que desempeña la serotonina en

esas vías y, por tanto, amortiguar el estímulo desde las regiones frontales.

El tratamiento eficaz de DOC graves nos indujo a suponer que la CMI podría prescribirse para tratar otras alteraciones con las que guardaran relación biológica. De nuestros trabajos se hizo eco una cadena de televisión nacional en marzo de 1987; a raíz de ello, miles de pacientes vinieron de consulta; había muchas mujeres que tenían un solo síntoma compulsivo: se tiraban y arrancaban una hebra de cabello con frecuencia. Esta tricotilomanía, así se llama el síntoma, no suele asociarse a los DOC. Podría ser grave; muchas que lo sufren no han podido ser vistas por sus familiares nunca sin una peluca.

Prosiguiendo otros ensayos iniciales, se sometieron a tratamiento catorce tricotilomaníacas en una comparación a doble ciego entre la CMI y la DMI, a semejanza del estudio realizado entre pacientes con DOC. La CMI frenó el hábito de tirarse del cabello; la DMI, antidepresivo tradicional, no sirvió. Schapiro, Grady y Swedo están abordando ahora investigaciones con tomografía por emisión de positrones sobre pacientes tricotilomaníacos; sospechamos que revelarán el mismo patrón de anomalías en el circuito lóbulo frontal-ganglios basales que se observó en pacientes con la enfermedad obsesivo-compulsiva, de más fácil detección.

El tratamiento selectivo y con éxito de la tricotilomanía abre algunos interrogantes acerca de otros comportamientos tan enojosos cuan forzados. ¿Respondería el hábito de comerse las uñas a la misma terapéutica? ¿Qué decir de la cleptomanía y otros impulsos incontrolables? Hay en proyecto ensayos clínicos en los que esos trastornos se traten con medicinas antiobsesivas. Quizá la nueva biología de los DOC obligue a replantearnos la inclusión de otros comportamientos disparatados bajo una amplia categoría de síndromes compulsivos, unidos por patrones de herencia similares, por imágenes cerebrales parecidas y por una misma respuesta a determinados fármacos.



8. PACIENTE TRICOTILOMANIACA: está como obligada a tirarse del cabello. Algunos resultados provenientes de estudios realizados en el Instituto Nacional de Salud Mental muestran que la tricotilomanía puede ser tratada con agentes anti-DOC. Numerosas condiciones patológicas que responden a estas medicinas podrían acabar reclasificadas en virtud de sus relaciones subyacentes con las obsesiones y compulsiones.

Presiento que, a más largo plazo, el devenir de estos trabajos incluso traerá un cambio fundamental en la comprensión de la evolución, la mente y los rituales humanos. En nuestro modelo, los ganglios basales son el depósito de unidades de comportamiento que se han ido organizando en el transcurso de la evolución. Está comprobado que los objetos de fobias (serpientes, arañas o grandes alturas) constituyen una amenaza para la humanidad, no carentes de significación evolutiva. En la misma onda, la formación de los rituales obsesivo-compulsivos podría interpretarse desde un punto de vista evolutivo y etológico. La limpieza, el aseo personal y la comprobación del orden y los límites territoriales cumplieron unas funciones cruciales durante la evolución humana.

Quizás bajo la acción del estrés, estos paquetes de información inteligente y programada se acoplan con ciertos estímulos que se perciben como peligrosos. Una vez que el sistema se pone en marcha, este circuito no puede interrumpirse: el paciente se convierte en un escéptico que no concede crédito a sus datos sensoriales o a sus intentos de refutar la obsesión por medio de la lógica. El paciente no puede aceptar la información tranquilizadora de que la puerta está cerrada o el interruptor apagado. En efecto, la incapacidad del paciente para prestar fe le hace desarrollar un comportamiento ritual que parece hallarse cincelado en su cerebro con un inesperado nivel de complejidad. Aunque estas ideas se mueven en el ámbito de la mera especulación, podrían llevarnos hacia la contribución científica más profunda de los DOC: el desarrollo de una biología de la duda y, por último, una biología de la creencia.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

OBSESSIVE COMPULSIVE DISORDERS. Editado por Michael A. Jenike, Lee Baer y William Minichiello. PSG Publishing Company, Inc., 1986.

OBSESSIVE COMPULSIVE DISORDER IN CHILDREN AND ADOLESCENTS. Dirigido por Judith L. Rapoport. American Psychiatric Press, Inc., 1988.

THE BOY WHO COULDN'T STOP WASHING: THE EXPERIENCE AND TREATMENT OF OBSESSIVE-COMPULSIVE DISORDER. Judith L. Rapoport, E. P. Dutton, 1989.

Factores de erosión

La erosión no se debe sólo a distintos factores naturales, relacionados entre sí, sino que el hombre interviene también de una manera destacada en su aceleración

Joaquín del Val

La Tierra es un planeta en continua evolución y cambio. Su dinámica interna tiene por expresión más característica e importante la movilidad de las placas litosféricas y los fenómenos asociados a este hecho: apertura y cierre de océanos, formación de cadenas montañosas, vulcanismo y sismicidad, entre otros. Posibilitado todo ello gracias a la energía interna del planeta. Además, la capa gaseosa que lo envuelve —la atmósfera— es la causa fundamental, en su interacción con la superficie terrestre, de la dinámica externa, cuyas manifestaciones principales son los procesos de erosión, transporte y sedimentación, ligados íntimamente al ciclo hidrológico.

De esta forma, el aspecto y evolución de la superficie de nuestro planeta deriva de la interacción entre la dinámica interna y la externa: ésta tiende a nivelar e igualar, a través de la erosión y la consecuente distribución de sedimentos, las grandes irregularidades y desniveles creados por aquélla. Por tanto, podemos considerar la erosión como un proceso geológico natural, constituyente del ciclo externo de erosión-transporte-sedimentación, derivado de la existencia de la atmósfera y de un potencial regular, la gravedad. El campo de actuación de la erosión es toda la superficie emergida del planeta; aunque actúa también por debajo del nivel del mar, lo hace restringida principalmente a las zonas litorales, plataformas y taludes continentales.

JOAQUIN DEL VAL MELUS estudió ciencias geológicas en la Universidad Complutense de Madrid. Ha trabajado en distintos campos de geología aplicada a la ingeniería, riesgos geológicos y estudios de geología ambiental. Desde 1984 presta sus servicios en la División de Ingeniería Geoambiental, del Instituto Tecnológico Geominero de España. Forma parte del profesorado del curso de riesgos geológicos que organiza este centro; colabora en diversos proyectos y estudios de investigación y aplicación sobre temas de erosión, destacando los que realiza en la actualidad con el Instituto del Suelo y Concentración Parcelaria de Navarra.

Como ocurre con otros fenómenos y temas de investigación, el estudio de la erosión exige el manejo de escalas muy dispares, tanto espaciales como temporales. Las escalas espaciales abarcan desde la continental, o incluso planetaria, en un extremo, hasta la microscópica en el otro, con todas las posibilidades intermedias. En cuanto al tiempo, la erosión se manifiesta en episodios que son unos de muy corta duración (como la que se puede producir a consecuencia de una tormenta), otros duran decenas o centenas de años (la erosión por incisión de una red fluvial) y los hay de muy larga duración o de escala geológica (el arrasamiento de una cordillera, por ejemplo). Ante semejante variabilidad espacial y temporal del proceso resulta obligado acotar las dimensiones físicas del problema que se pretenda abordar. Más aún, cada uno de los distintos factores de control del proceso tendrán mayor o menor peso relativo en función de la premisa anterior.

Los factores que, en última instancia, determinan el sistema de erosión son climáticos y geológicos. De ellos derivan otros como la vegetación, la litología, las pendientes, los suelos, la organización y tipo del sistema erosivo, etcétera. Estos se presentan interrelacionados, de forma que no son variables independientes a lo largo del tiempo, aunque se les pueda considerar como tales para un instante determinado o un período de tiempo muy corto. La interdependencia real de los factores de control de la erosión, junto con el amplio orden de magnitud de las escalas temporal y espacial en que se manifiesta el proceso y, por último, la variación del peso relativo de cada uno de los factores en cuanto a los diferentes rangos de las escalas de tiempo y espacio que se consideren, configuran la gran complejidad y variedad de los estudios de erosión.

En la superficie terrestre encontramos distintos sistemas de modelados del relieve; dan lugar a formas de erosión y de deposición o sedimentación características, que van marcando las grandes pautas de evolución del relieve. A estos sistemas se les denomina morfogenéticos y, en gran parte, son resultado de la acción climática. Así, el sistema glacial se presenta en regiones árticas, polares y en zonas de alta montaña, donde la temperatura es suficientemente baja y la precipitación caída en forma de nieve se conserva dando lugar a acumulaciones de hielo. Los glaciares así creados realizan un importante trabajo de erosión en su movimiento, que queda reflejado en formas y depósitos característicos, como la excavación de valles en *U* y los depósitos morrénicos. En el sistema eólico-desértico, por el contrario, el agente principal de erosión y transporte es el viento. Ambos sistemas ocupan una amplia extensión superficial en el planeta y podemos hablar de ellos como sistema de erosión glacial y sistema de erosión eólico, respectivamente.

Otros sistemas o subsistemas morfogenéticos que aparecen en la tierra emergida quedan definidos por la morfología que originan y los depósitos a que dan lugar, pero el más importante de todos es el sistema fluvial. Los ríos no son sólo activos agentes del modelado terrestre, sino que constituyen también las principales vías de transporte de materia mineral desde los continentes hasta los océanos, lo que supone estrechas relaciones con otros sistemas morfogenéticos. Ejemplos de estas relaciones son los cursos situados en

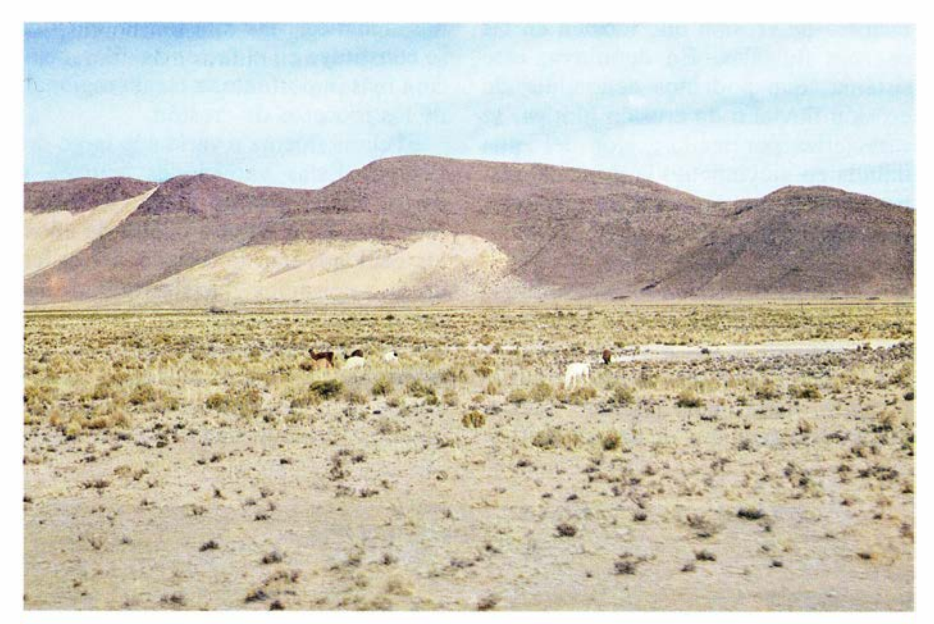
márgenes de glaciares, el suministro de material por procesos eólicos o su íntima asociación con la dinámica litoral en la formación de deltas y estuarios. Por otra parte, es en el dominio de las cuencas fluviales donde están los asentamientos de la gran mayoría de la población mundial, así como de la agricultura. Ello significa que es en estas regiones donde la erosión del suelo puede llegar a tener una importante repercusión, no sólo sobre la economía, sino, incluso, sobre el futuro de la humanidad. Por ese motivo, dedicaremos nuestra atención a este sistema y a los factores de erosión que inciden en las cuencas fluviales. En definitiva, este sistema, que podemos denominar de erosión fluvial o de erosión hídrica, se caracteriza por ser la acción del agua líquida en movimiento la principal responsable de los procesos de erosión y sedimentación.

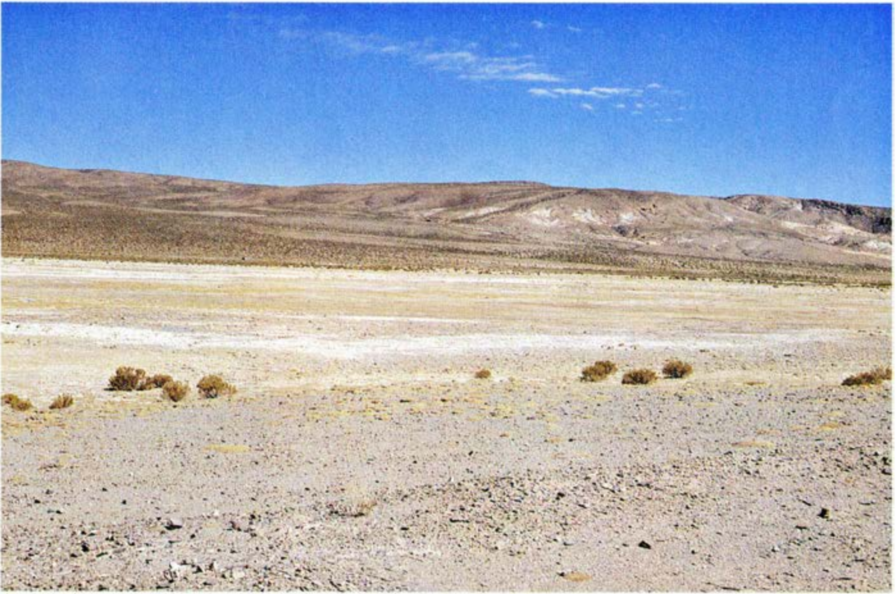
Del clima dependen los mecanismos físicos y químicos que actúan sobre la superficie del planeta; por otro lado, determina el agente erosivo —viento, hielo, agua líquida— predominante en cada una de las grandes zonas climáticas. De esta forma, el clima se constituye en el factor de diferenciación más importante, a escala regional, de los procesos de erosión.

El clima fluctúa o varía a lo largo del tiempo. Estas variaciones ocurren a corto, medio y largo plazo. Recordemos que, en el último millón de años, los geólogos han detectado del orden de diez episodios glaciales que afectaron a amplias extensiones continentales. El último gran retroceso de los glaciares ocurrió hace sólo unos 11.000 años y, al fundirse una gran cantidad de hielo, se produjo una elevación gene-



1. EROSION DEL SURESTE DE LA PENINSULA IBERICA, una de las zonas más afectadas de Europa. Confluyen en ello varias razones. El régimen climático es semiárido, con escasas precipitaciones medias anuales, si bien alcanzan altas intensidades en períodos de tiempo muy cortos, con la consiguiente capacidad erosiva. En esta imagen, en falso color, tomada por el satélite Landsat en 1985, el rojo representa, además de los cultivos, la vegetación natural, escasísima, por lo que el suelo queda desprotegido. Los relieves, generados a partir de la orogenia alpina, son muy energéticos y dan origen a cuencas torrenciales de funcionamiento esporádico. Las avenidas, relativamente frecuentes, resultan de gran eficacia geomorfológica, incorporándose importantes caudales sólidos. Se pueden observar numerosos fenómenos de intensa disección y acarcavamiento por arroyada como, por ejemplo, en los abanicos existentes al pie de Sierra Alhamilla, en el centro de la parte inferior de la fotografía. El desierto de Tabernas es la zona oscura que hay por encima y la zona clara, inmediatamente a su derecha, corresponde al karst en yesos de Sorbas. El río que aparece en la parte inferior izquierda es la rambla del Andarax, que ha dado lugar a numerosas inundaciones en la ciudad de Almería, situada junto a su desembocadura. El relieve del centro de la imagen es la Sierra de los Filabres, por cuyo pie, más arriba, discurre el río Almanzora. En la parte superior izquierda se aprecian los intensos acarcavamientos existentes en la Depresión de Baza. Las lineaciones de la derecha, en el ángulo inferior con dirección noreste-sureste y en el ángulo superior, son las fracturas activas de Serrata-Carboneras y de Palomares.





2. LAS ZONAS ARIDAS Y SEMIARIDAS, caracterizadas por una gran escasez de precipitaciones, ocupan alrededor de una tercera parte de la superficie emergida del planeta y soportan una sexta parte de la población mundial. Con una vegetación virtualmente inexistente o muy escasa, el suelo queda sin protección y el viento barre con facilidad las partículas sueltas, procedentes de la meteorización de las rocas o de acumulaciones previas por distintos mecanismos (canales efímeros, evolución de laderas, transporte eólico, etcétera). Las fotografías aquí presentadas corresponden al altiplano del noroeste de Argentina, donde se da una intensa erosión eólica, con acumulaciones locales de dunas (*arriba*). Un problema adicional que condiciona el empobrecimiento de estos suelos es el relativo a su salinización, al ser la evaporación netamente superior a la lluvia caída, las sales se precipitan en los horizontes superficiales (*foto inferior*). En charcas o lagunas temporales poco profundas las sales se concentran formando llanuras salinas completamente estériles.

ralizada del mar, de hasta ciento cincuenta metros con respecto a 18.000 años atrás, en plena era glacial. Ello significó un cambio climático y del régimen de precipitaciones de amplias zonas y un reajuste de los sistemas fluviales, con las consecuentes modificaciones en los procesos de erosión y sedimentación. En estos últimos 10.000 años se conocen diferentes fluctuaciones climáticas y, en el último siglo, se sabe, gracias al aluvión de datos meteorológicos acumulados durante este período, de la enorme variabilidad y contrastes climáticos existentes. Otro tipo de variaciones climáticas, de carácter cíclico, son las derivadas de los efectos estacionales, que influyen en la eficacia de los procesos de erosión, por los cambios que producen en las características de la vegetación, del suelo, de la frecuencia e intensidad de las precipitaciones y, en definitiva, en el ciclo hidrológico general. Hay otros tipos de variaciones climáticas, unas de carácter cíclico o periódico, como las debidas a los cambios de actividad solar con períodos de once años o las que se establecen entre la sucesión día-noche, y otras de carácter no cíclico, como las que provienen por modificaciones en la transparencia de la atmósfera por aporte de partículas, cuyo origen no antrópico más importante son las explosiones volcánicas.

Una de las relaciones más conocidas y usadas entre erosión y clima la estableció Frédéric Fournier, de la Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer, en 1960. Estudiando una serie de cuencas fluviales, de superficie de más de 2000 kilómetros cuadrados, llegó a la conclusión de que la erosión, a la que denominó degradación específica, era función fundamental del clima y, más concretamente, del régimen de lluvias. Este régimen de lluvias lo caracterizó por la relación p^2/P, donde p simboliza la precipitación del mes más lluvioso expresada en milímetros, y P representa la precipitación anual, expresada también en milímetros. En la relación de Fournier, la erosión depende de la distribución y abundancia de precipitaciones, de la altura media de la cuenca y de la pendiente media de dicha cuenca. Acorde con esa relación, las áreas con fuertes contrastes estacionales en el régimen de precipitaciones y con lluvias muy irregularmente repartidas a lo largo del año serían altamente susceptibles a la erosión, como se comprueba en las áreas que bordean el Mediterráneo y, en general, en regiones semiáridas.

Con el aumento general de la precipitación y su repartición menos irregular a lo largo del ciclo hidrológico, se dan las condiciones para el desarrollo de una cubierta vegetal estable, protectora del suelo. En climas tropicales con marcada precipitación estacional, como ocurre en las zonas sometidas al ciclo monzónico, vuelven a ser importantes los contrastes de precipitación y, por tanto, alta la susceptibilidad a la erosión. En las regiones ecuatoriales, donde existe una cubierta vegetal que puede llegar a ser muy densa, la erosión se manifiesta por intensos procesos de meteorización (o lo que es lo mismo, de rotura, disgregación y descomposición de rocas en superficie), debido a las altas temperaturas, continuas precipitaciones y el efecto de ácidos orgánicos y de microorganismos, acelerando las reacciones químicas que descomponen las rocas. Así, se forman potentes suelos que pueden tener gran estabilidad frente a la erosión, siempre que no se elimine la cubierta vegetal.

¿Cómo procede la erosión a partir de una determinada precipitación? La caída de las gotas de lluvia dispersa y separa las partículas del suelo, con lo que se inicia la pérdida del mismo. La eficacia de la lluvia en esa disgregación depende directamente de su energía cinética, es decir, de la masa de cada una de las gotas y de su velocidad. Una gota de lluvia alcanza una velocidad límite, llamada velocidad terminal, que no puede sobrepasar y que, lo mismo que la masa, es función del diámetro de la gota. Ante la dificultad de evaluar directamente este diámetro, se recurre al registro de la intensidad de lluvia, que es la cantidad que cae en cada instante, dato que se puede obtener con el empleo de un pluviógrafo de registro continuo. Como existe una relación entre la intensidad de la lluvia y la distribución de las gotas que la componen por tamaños, quedan así relacionadas la intensidad de lluvia y la energía cinética.

Una de las relaciones más conocidas entre la precipitación y la pérdida de suelo viene dada por el producto entre la energía cinética de la lluvia y su máxima intensidad en 30 minutos. Este índice, que suele denominarse índice de erosividad por lluvia de Wischmeier o bien, simplemente, $E.I._{30}$, se utiliza ampliamente, aunque no siempre ni por todos.

Una vez que el agua llega al suelo no sólo se produce erosión por el impacto de las gotas de lluvia. Cuando la intensidad de la lluvia supera la capacidad de infiltración del terreno se forma la arroyada superficial. Si la pendiente o naturaleza del suelo es favorable, se irá produciendo una remoción más o menos uniforme del nivel u horizonte superficial, dando lugar a una erosión de tipo laminar. En las fotografías aéreas se identifica fácilmente este tipo de erosión; al haberse arrastrado el horizonte superficial, con mayor cantidad de materia orgánica y por tanto más oscuro, se producen irisaciones y coloraciones claras en el suelo en las zonas donde se ha manifestado el fenómeno. Si la arroyada se concentra, se abren pequeñas incisiones, que producen una erosión en regueros o surcos de tamaño centimétrico o decimétrico. Si estas incisiones progresan en profundidad pueden llegar al orden métrico o decamétrico: se crea de ese modo la erosión en cárcavas y barrancos, con lo que el problema se acentúa al verse atacada la misma roca madre sobre la que se asienta la formación superficial o el suelo.

La vegetación natural es reflejo de los distintos tipos de zonas y pisos climáticos, con adaptaciones y variaciones específicas al medio. La cubierta vegetal frena la erosión; experimentos de distinta índole lo confirman. En Zimbaue, durante un período de tres años, se midió una pérdida media anual de suelo cien veces mayor en un área desnuda que en otra similar con una densa cubierta vegetal. La vegetación intercepta las gotas de lluvia y alivia su impacto directo sobre el suelo, al disipar la energía cinética de las mismas. Además, la vegetación presenta otras propiedades que inciden directamente en la disminución de la erosión; por ejemplo, aporta materia orgánica al suelo. Con ello se favorece la formación de agregados entre las partículas de los minerales arcillosos, muy abundantes en el suelo. Más difícil resulta separar estos agregados de partículas, formados muchas veces al facilitar la materia orgánica la creación de puentes de cationes bivalentes. La materia orgánica también ayuda a estabilizar los agregados ya existentes.

Una vez que se ha producido la escorrentía superficial (es decir, la porción de precipitación que discurre libre o encauzadamente por el suelo), la vegetación disminuye la velocidad de circulación del agua y, consecuentemente, su poder erosivo. Además, la vegetación aumenta la capacidad de infiltración del suelo, por lo que la escorrentía superficial necesitará de mayores precipitaciones para producirse, dificultando así la aparición de la arroyada, ya sea difusa o concentrada.

El sistema radicular de las plantas supone, especialmente en las de raíz profunda, una sujeción al suelo, que se opone a ciertos movimientos de las laderas. Los deslizamientos son movimientos gravitacionales de masas de roca o suelo: éstas se deslizan sobre una o varias superficies de rotura, al superarse la resistencia al corte en estos planos, produciéndose un movimiento del material en conjunto. La implantación de vegetación cuyas raíces penetren más allá de las posibles superficies de rotura de las laderas amortigua el riesgo de deslizamiento, especialmente el superficial.

La vegetación presenta, como vemos, una serie de características que se traducen, de forma inmediata, en una reducción de las pérdidas de suelo. Pero influye, además, en la creación de situaciones microclimáticas favorables para la conservación del suelo, sobre todo las masas forestales arbóreas, al reducir las temperaturas máximas y mínimas y disminuir la radiación solar directa sobre el suelo.

Si el clima es el elemento activo o energético de la erosión, el elemento pasivo o resistente sobre el que actúa es el suelo, ya se trate de un suelo en sentido estricto o edafológico (entendiendo éste como el complejo organomineral superficial, constituido por capas diferenciadas u horizontes que forman el conjunto denominado perfil edáfico) o bien se trate de una formación geológica superficial o un conjunto rocoso, ya sea de origen sedimentario, ígneo o metamórfico. A escala de los tiempos geológicos, la erosión alcanza a todo tipo de materiales. Pero en una escala de tiempo muchísimo más corta, incluso próxima a la humana, el proceso de la erosión se presenta en conjuntos edáficos y en unidades geológicas de superficie con escasa compactación y pobremente cimentadas.

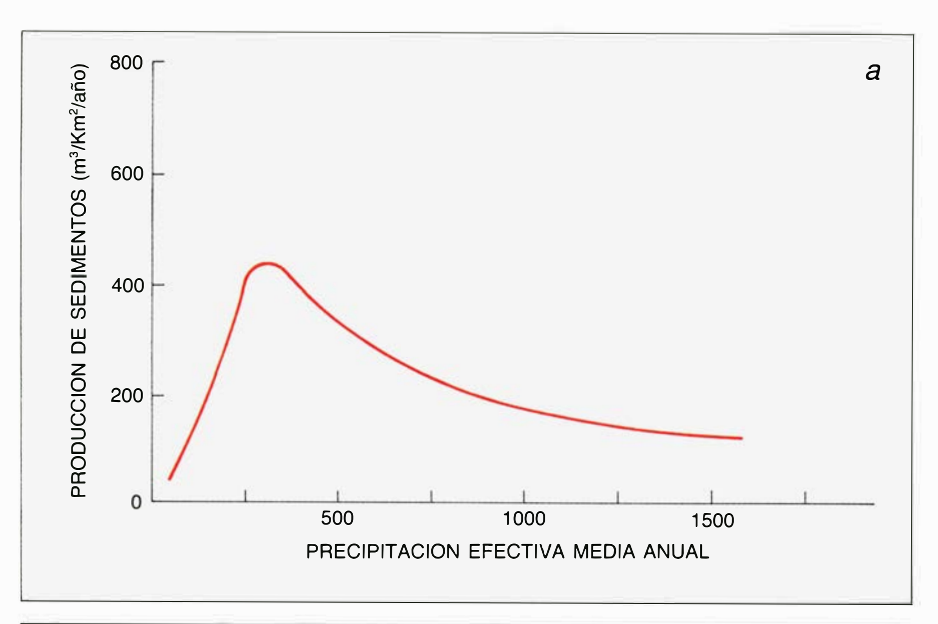
Fue F. Hjulström, de la Universidad de Uppsala, quien puso de manifiesto, en los años treinta, que, para sedimentos bien seleccionados, había una relación entre la velocidad del flujo del agua y el diámetro de las partículas del sedimento, por un lado, y los procesos de erosión, transporte y sedimentación, por otro. Los sedimentos no compactados ni cementados que requieren menor energía para su movilización y, por tanto, de más fácil erosión, son los limos y arenas finas. Los limos son sedimentos compuestos por partículas con tamaño de grano entre 4 y 62,5 micras. Las arenas más erosionables corresponderían a las de tamaños de grano entre 62,5 micras y 0,75 milímetros, aproximadamente. Las partículas mayores requieren una fuerza también mayor para ponerlas en movimiento. Los sedimentos con tamaño de partículas inferiores a las cuatro micras están compuestos mayoritariamente por minerales arcillosos, con lo que ya no se comportan como sistemas dispersos; presentan propiedades cohesivas debido a sus cargas eléctricas. De esta forma, los suelos con altos contenidos en partículas de tamaño limo son bastante erosionables frente a otros tipos de suelos.

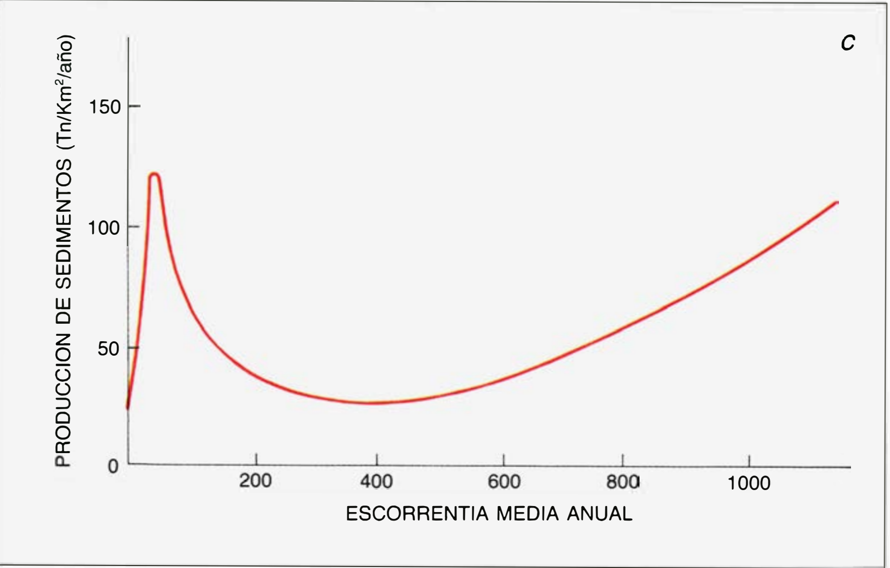
No existe, sin embargo, un criterio único de susceptibilidad a la erosión del suelo en función del tamaño individual de sus componentes. Para algunos autores, los suelos con un contenido en limo entre el 40 y el 60 por ciento son

los más erosionables. Otros prefieren examinar la susceptibilidad a la erosión en función del contenido de arcilla; los suelos con una reducida fracción arcillosa, entre el 9 y el 30 por ciento, serían los más vulnerables a la erosión. De esta opinión participa Royston Morgan, de la Universidad de Bedford, y se basa en que las partículas de arcilla, al combinarse con la materia orgánica, forman agregados estables debido a los fuertes lazos que existen entre sus coloides. La estabilidad de estos agregados determinaría la resistencia del suelo. En general, dicha estabilidad depende del tipo de mineral arcilloso presente. Las illitas y esmectitas desarrollan agregados con facilidad, pero su estructura abierta hace que cuando se humedecen y secan se produzcan procesos de hinchamiento y retracción, lo que da lugar a grietas que facilitan la incisión por el agua. Otros minerales arcillosos, como la caolinita, de estructura más cerrada, oponen mayor resistencia a la erosión.

Además de las características texturales y mineralógicas del suelo, debe examinarse el conjunto de los aspectos geológicos que intervienen en la intensidad y heterogeneidad de la erosión en un territorio. Dentro de una perspectiva amplia, la litología, la tectónica y el modelado morfológico –resultado éste de la interrelación de los dos primeros con el clima– constituyen los aspectos prioritarios.

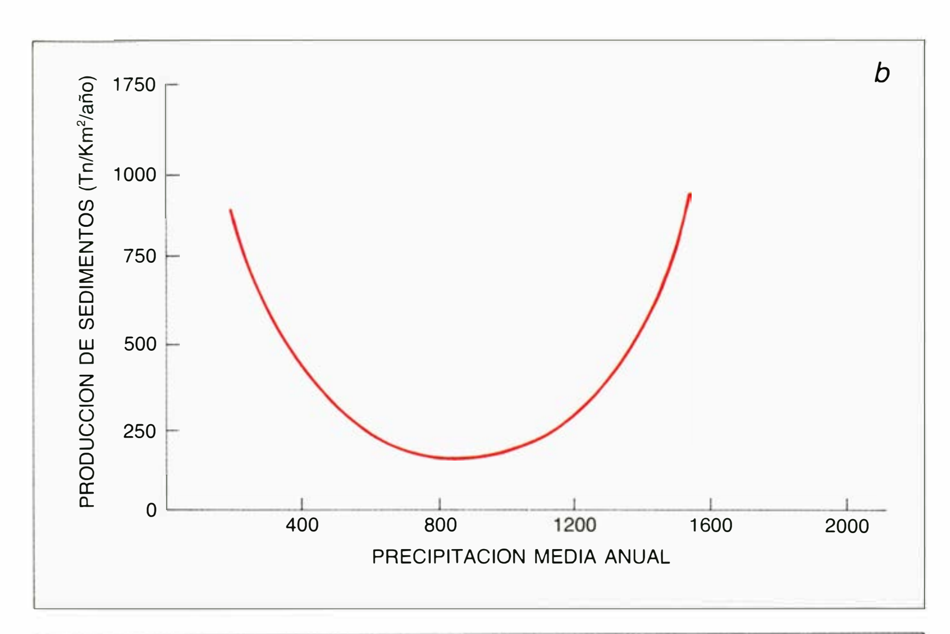
De la litología depende directamente la resistencia de los distintos materiales, así como su capacidad de infiltración, que condiciona la generación de escorrentía. En las zonas calcáreas, constituidas mayoritariamente por calizas y dolomías, la erosión, que da lugar al modelado kárstico, se produce por disolución; se registra en ellas altas tasas de infiltración y escaso desarrollo de la red de drenaje subaérea. En rocas graníticas y conjuntos metamórficos poco meteorizados, la erosionabilidad intrínseca de los materiales puede ser baja, aunque la red de drenaje se ramifica y ahonda, a veces. Pero las mayores condiciones de erosionabilidad convergen en formaciones limo-arcillosas y en margas (rocas intermedias entre arcillas y calizas, en las que el contenido de cada una está comprendido entre el 35 y el 65 por ciento); se dan también condiciones propicias para la erosión en conglomerados arenosos con matrices arcillosas, en areniscas débilmente cementadas, en formaciones arenosas derivadas de la destrucción de granitos, en materiales piroclásticos (formados por acumulación de partículas sólidas expulsadas por un volcán), así como, en general, en rocas disgregables o meteorizadas, especialmente en aquellas en las que en el proceso de desintegración de la roca se libera un alto porcentaje de arcillas.

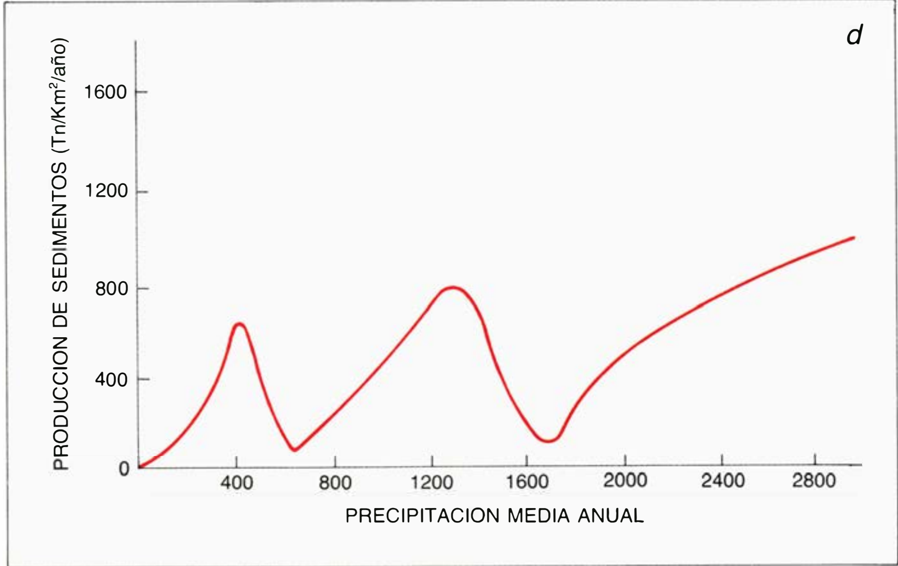




3. PRODUCCION DE SEDIMENTOS derivados de la erosión y su relación con distintas condiciones climáticas. El clima se expresa en términos de precipitación media anual o bien en términos de escorrentía. En el modelo *a*, ideado por Walter B. Langbein y Stanley A. Sahumm, el máximo de erosión se da para unas condiciones de unos 300 mm anuales de precipitación efectiva o precipitación necesaria para producir una cantidad conocida de escorrentía. Por debajo de los 300 mm, la escorrentía es pequeña; con valores superiores, se presentan unas condiciones de abundante cobertera vegetal que confiere una protección importante al suelo. En los modelos *b* y *c*, creado aquél por Frédéric Fournier y éste por Ian Douglas, la producción de

En la mayoría de estos tipos litológicos erosionables pueden aparecer áreas características denominadas "malas tierras" o *badland*. Los conquistadores españoles llamaron "malas tierras" a ciertas áreas del sureste de América del Norte para referirse a laderas naturales intensamente abarrancadas, con vegetación muy dispersa o inexistente y no aptas para la agricultura. Se las ha supuesto originadas por procesos fluviales y definidas por una densa red de drenaje que da vallecitos en "uve", interfluvios estrechos y laderas abruptas, que a menudo terminan en superficies planares de suave pendiente (pedimentos o micropedimentos). A estas áreas se les venía atribuyendo unas altas tasas de erosión, aunque actualmente se ha comprobado que pueden presentar tasas de erosión muy variables, incluso notablemente bajas. Pero el término *badland* se ha generalizado hasta incluir otras áreas en las que los procesos de sufusión y





sedimentos comienza de nuevo a aumentar a partir de los 1100 milímetros de precipitación media anual, alcanzándose un segundo máximo de erosión entre 1200 y 1500 milímetros en climas húmedos con estación de lluvias marcada. De hecho, la variabilidad de la precipitación puede ser un dato más significativo de cara a la erosión que la precipitación media anual. En el modelo *d*, de D. E. Walling y A. H. A. Kleo, el primer máximo de erosión se corresponde con el *a*, mientras que los otros dos máximos de erosión indican los efectos de regímenes de precipitación estacional: el máximo entre 1250 y 1350 mm representa la intensa erosión en climas mediterráneos de alta precipitación; y el tercer máximo corresponde a zonas de clima tropical.

movimientos en masa se combinarían con procesos fluviales para engendrar una topografía rugosa y accidentada.

La sufusión consiste en la formación de conductos o túneles naturales en el suelo o en depósitos poco o nada consolidados, por lavado y erosión subsuperficial, al desarrollarse importantes gradientes hidráulicos. Aunque su papel geomorfológico e hidrológico no es suficientemente conocido en las áreas de *badlands*, puede convertirse allí en el proceso denudacional más importante. En la región de Las Bardenas, en la zona central de la cuenca del Ebro, el trabajo que estamos realizando en una pequeña cuenca, en un área de *badland*, en colaboración con el Instituto del Suelo y Concentración Parcelaria de Navarra, apunta en este sentido a la sufusión como el proceso más importante de retroceso de cabeceras de barrancos y de formación de nuevos cauces y, en definitiva, de movilización y pérdida de suelo. El proceso se manifiesta en glacis coluviales y conos de derrame, que presentan contenidos del orden del 80 por ciento de partículas de tamaño limo, fácilmente evacuables por erosión subsuperficial.

Vayamos con el segundo aspecto. La evolución tectónica determina la distribución de las grandes unidades morfológicas, condicionando la distribución de los relieves y la energía de los mismos. Podemos considerar tanto más energético un relieve cuanto mayor sea su diferencia de altura o desnivel con respecto a la zona donde se acumula el sedimento originado por la destrucción de ese relieve, temporal o definitivamente. Entre las zonas con más altas tasas de erosión figuran las regiones montañosas de Los Andes, Himalaya, Karakorum y Rocosas, de las que se estiman tasas medias de rebajamiento por erosión de hasta casi 100 centímetros por cada mil años, mientras que la atribuida al resto de las tierras bajas continentales no alcanzaría ni 10 centímetros de media cada mil años.

Además, la actividad tectónica reciente, o neotectónica, promueve rejuvenecimientos en el relieve que aumentan bastante la erosión y la producción, consecuentemente, de nuevos depósitos. Se presenta así un factor añadido que provoca aceleraciones en la erosión en regiones donde, por su fuerte energía de relieve, poseían ya una alta proclividad a la erosión. Las acumulaciones generadas por la destrucción de estos relieves, inestables a menudo y con escasa o nula compactación, se erosionan con facilidad.

La tectónica condiciona la situación y características de las principales cuencas de drenaje. Las cuencas fluviales son las unidades funcionales donde se realiza el proceso de redistribución de material, en una importante porción de la superficie terrestre, a través de los procesos de erosión, transporte y sedimentación. La erosión abarca todos los mecanismos de desprendimiento de fragmentos o partículas de suelo y roca de su lugar original. La sedimentación incluye la acumulación de todo este material, previamente transportado. El sistema fluvial constituye un sistema abierto en que la materia y la energía se intercambian continuamente con el medio ambiente exterior; los ríos son los agentes de erosión y transporte que trasladan el agua y los sedimentos suministrados a ellos desde la superficie terrestre hasta los océanos.

Las características de los distintos sistemas fluviales son reflejo de una serie de variables interrelacionadas e interdependientes entre sí: clima, geología, morfología y tamaño de las cuencas de drenaje, tipos de suelos, vegetación y usos del territorio. Todas estas variables configuran el régimen hidrológico y la cantidad y tipo de material erosionado y, por tanto, de sedimentos suministrados. Nos encontramos, pues,

con amplias variaciones en las concentraciones de sedimentos en suspensión. El Huang Ho, o río Amarillo, en China, cuya cuenca de drenaje está ocupada en una parte importante por grandes espesores de materiales de tipo loess (sedimento formado por acumulación de partículas, de tamaño limo, transportadas por el viento), acarrea una carga de sedimentos anual media del orden de 1600 millones de toneladas, mientras que el Dniéper, en Rusia, con caudal medio y área de drenaje similares, transporta una carga de sedimentos en suspensión que no supera el millón de toneladas por año.

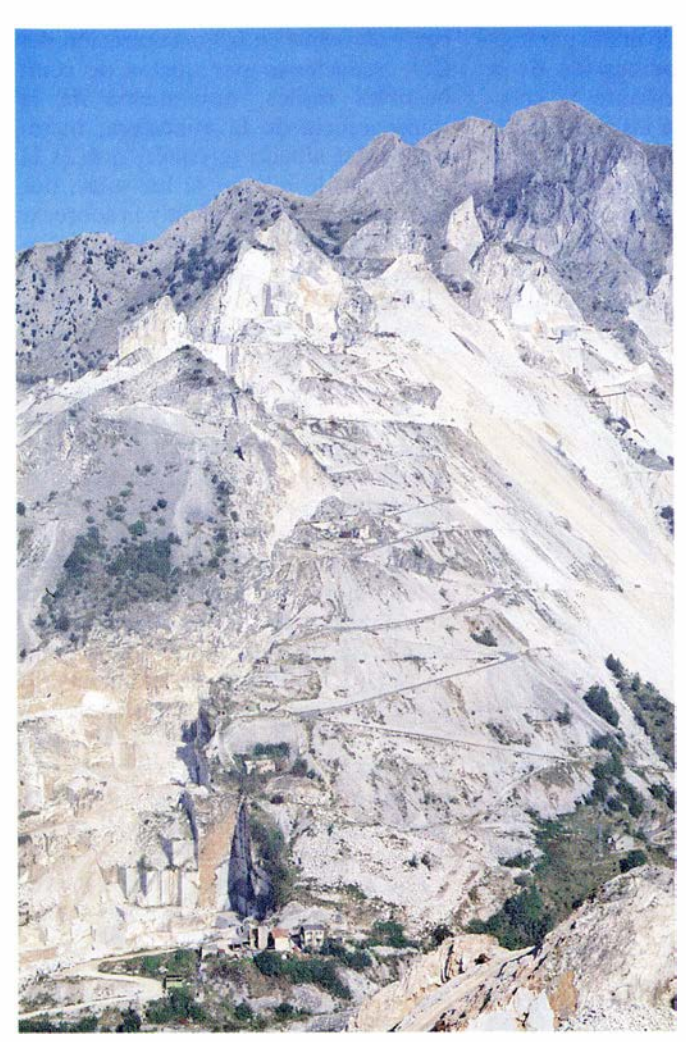
Dentro de la cuenca fluvial podemos considerar tres zonas: la de origen o de producción de sedimentos, donde predomina la erosión, la zona de transferencia o de transporte de carga a través de los canales y la zona de recepción o de acumulación de sedimentos. Dentro de cada una de ellas, se dan los tres tipos de procesos.

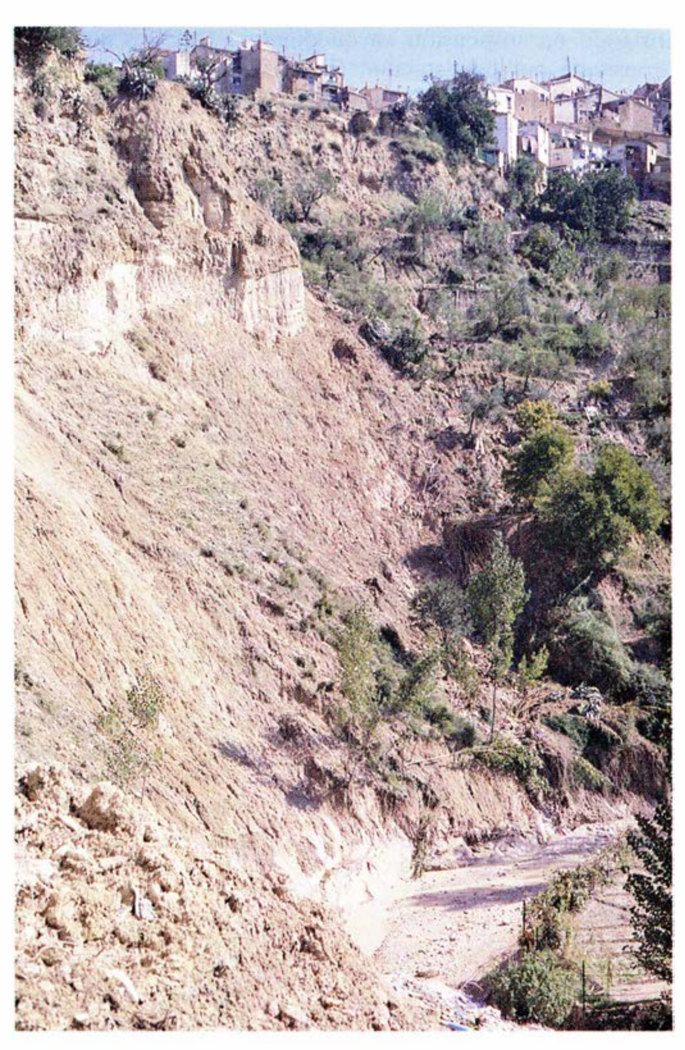
La zona de producción de sedimentos, en que predomina la erosión, se sitúa en las cabeceras de los valles y partes altas de las cuencas. Las laderas se ven sometidas a intensos procesos de erosión superficial, además de otros como la sufusión y los deslizamientos y movimientos de ladera. El río o canal transporta una parte de todo este material movilizado, que llega hasta él y que, por tanto, no queda acumulada temporalmente. El río, eje de evacuación de todo este material, va erosionando también sus propios límites, su lecho y márgenes, incorporándolo a la carga transportada. Dentro de esta carga, distinguimos tres componentes: la carga en disolución, que es todo el material que se transporta disuelto; la carga en suspensión, que corresponde a partículas muy finas, limos o arcillas, que siempre circulan así en el seno del fluido, o bien mayores, cuando pueden ser mantenidas, aunque sólo transitoriamente, dentro del fluido por medio de las componentes fluctuantes verticales de la velocidad, que proporcionan el efecto de sustentación necesario frente a la velocidad de caída de las partículas; por último, la carga de fondo, que incluye todos los materiales que son movidos por saltación, rodamiento y arrastre. La carga de sedimentos que transporta un río es una función de potencia simple de su caudal, del tipo $Q_s = a\ Q^b$, donde Q_s representa la carga sólida, Q el caudal, y a y b son parámetros adimensionales.



4. FENOMENOS DE SUFUSION en la región de Las Bardenas, en la zona central de la cuenca del río Ebro. Este proceso erosivo consiste en la formación de conductos subterráneos por arrastre subsuperficial de material en sedimentos que se hallan poco o nada compactados. De esta forma, retroceden las cabeceras de los barrancos y se amplían lateralmente, disminuyendo en estas parcelas la superficie útil para cultivo.

Aunque la carga de sedimentos transportada puede variar enormemente en el tiempo, los aumentos en la concentración de sólidos provienen sobre todo de la erosión del conjunto de la cuenca y, en mucha menor medida, de la erosión del cauce. En lo referente a la extensión de la cuenca, se observa que, para condiciones similares, la carga de sedimentos transportada por unidad de área suele disminuir con el aumento de superficie de cuenca de drenaje, debido a la mayor acumulación proporcional de sedimentos, tanto en forma de conos de deyección y abanicos aluviales como en el lecho del río y zonas próximas y en la llanura de inundación. La llanura de inundación es la zona adyacente al cauce del río, relativamente suave y construida por él, que se inunda cuando el nivel del agua sobrepasa sus orillas. En estas zonas predomina la acumulación de sedimentos, aunque el material se está construyendo y destruyendo continuamente y, por tanto, renovándose durante los períodos de avenidas.





5. LA MINERIA (*izquierda*) resulta, en numerosas ocasiones, una importante fuente de incremento de erosión, conociéndose casos de hasta 1000 veces superior la tasa anual de sedimentación en cuencas explotadas con respecto a otras cuencas sin minería en la misma zona. Las causas se deben a la propia eliminación del suelo y del soporte vegetal, a la alteración o interrupción de la red de drenaje superficial —por el propio hueco de la explotación o por la construcción de escombreras— y al aumento del caudal sólido de los ríos, bien sea por la erosión de escombreras o de la propia superficie que queda sin cobertera vegetal. La fotografía ha sido tomada en las explotaciones de mármol de Carrara (Italia), minería activa desde el tiempo de los romanos y que ha llevado a cabo amplias transformaciones paisajísticas y morfológicas. También en las avenidas (*derecha*), especialmente en las que aparecen generadas por muy altas precipitaciones en cortos períodos de tiempo, se removiliza una importante cantidad de material. En las inundaciones de otoño del año 1986 que se desencadenaron en el litoral mediterráneo occidental, se produjeron numerosos deslizamientos y profunda erosión en surcos en las laderas de las partes altas de las cuencas fluviales.

Las avenidas se producen cuando el curso fluvial recibe tal cantidad de aportes de agua, que se origina una subida del nivel que desborda las márgenes y ocupa las áreas adyacentes. En estos episodios, ligados a la propia dinámica fluvial, y que forman parte de su idiosincrasia, puede incrementarse notablemente la producción y redistribución de material.

Las causas que pueden determinar las subidas del nivel de las aguas de un río son múltiples. Obedecen, unas veces, a procesos de deshielo, en regiones templadas o templadas-frías donde se registran acumulaciones importantes de nieve durante el invierno y se funden al final de la primavera o inicio del verano. Otras vienen motivadas por taponamientos en cauces de ríos por deslizamientos de laderas. Pero la mayoría de las avenidas son causadas por un exceso de precipitación que supera la capacidad de infiltración y retención del terreno y de almacenamiento de los cauces. En la región mediterránea suelen producirse a partir de intensas tormentas, que dan lugar a fuertes precipitaciones muy concentradas en el tiempo. El impacto directo por gotas de lluvia, dadas las altas intensidades de precipitación, se hace muy importante en las zonas desprotegidas de vegetación. Como, por otra parte, se supera rápidamente la capacidad de infiltración del suelo, se favorece la escorrentía superficial generalizada que da lugar al arrastre de partículas del suelo, generándose o acentuándose la erosión laminar, en surcos y en cárcavas; se promueve la sufusión y crece la eficacia geomorfológica de los conductos y tubos preexistentes, y se facilitan los deslizamientos de laderas en equilibrio precario, tanto por la socavación o inundación del pie de las mismas por parte de los canales, como por la elevación del nivel freático en la ladera.

Al incrementarse el caudal sólido transportado por el río, aumenta el esfuerzo de cizalla basal de la corriente y, con ello, su capacidad para erosionar márgenes y cauce. De esta forma, el río gana en anchura y en profundidad, produciéndose cambios geomorfológicos en el cauce, que pueden llegar a migrar lateralmente o, incluso, a rectificar meandros. La respuesta en los tramos bajos del río se traduce en procesos de sedimentación. Debido a unas condiciones de pendientes más bajas, y a la amplitud de los valles, se generan en esta zona velocidades de corriente menores y la carga que el río iba trans-

portando en suspensión va quedando depositada por decantación. El resultado es un tapiz de sedimentos finos de pocos centímetros, aunque localmente pueda alcanzar más de un metro.

Hasta ahora, sólo hemos hablado de la erosión como un fenómeno natural. Sin embargo, el hombre ha introducido cambios notables en diversos parámetros naturales. La modificación de la dinámica fluvial —mediante la construcción de embalses o las rectificaciones de cauces—, de usos del suelo —talas de bosques, cultivos inapropiados, sobrepastoreo, explotaciones mineras, obras públicas— y los cambios climáticos —aumento en la concentración del CO_2 atmosférico por quema de combustibles fósiles, disminución de la transparencia de la atmósfera, incremento del albedo terrestre, que es la capacidad de reflejar la luz solar, por efecto de la deforestación y la sobreexplotación de pastos, que incide en la inhibición de formación de nubes y precipitación— permite afirmar que el hombre es un poderoso agente erosivo.

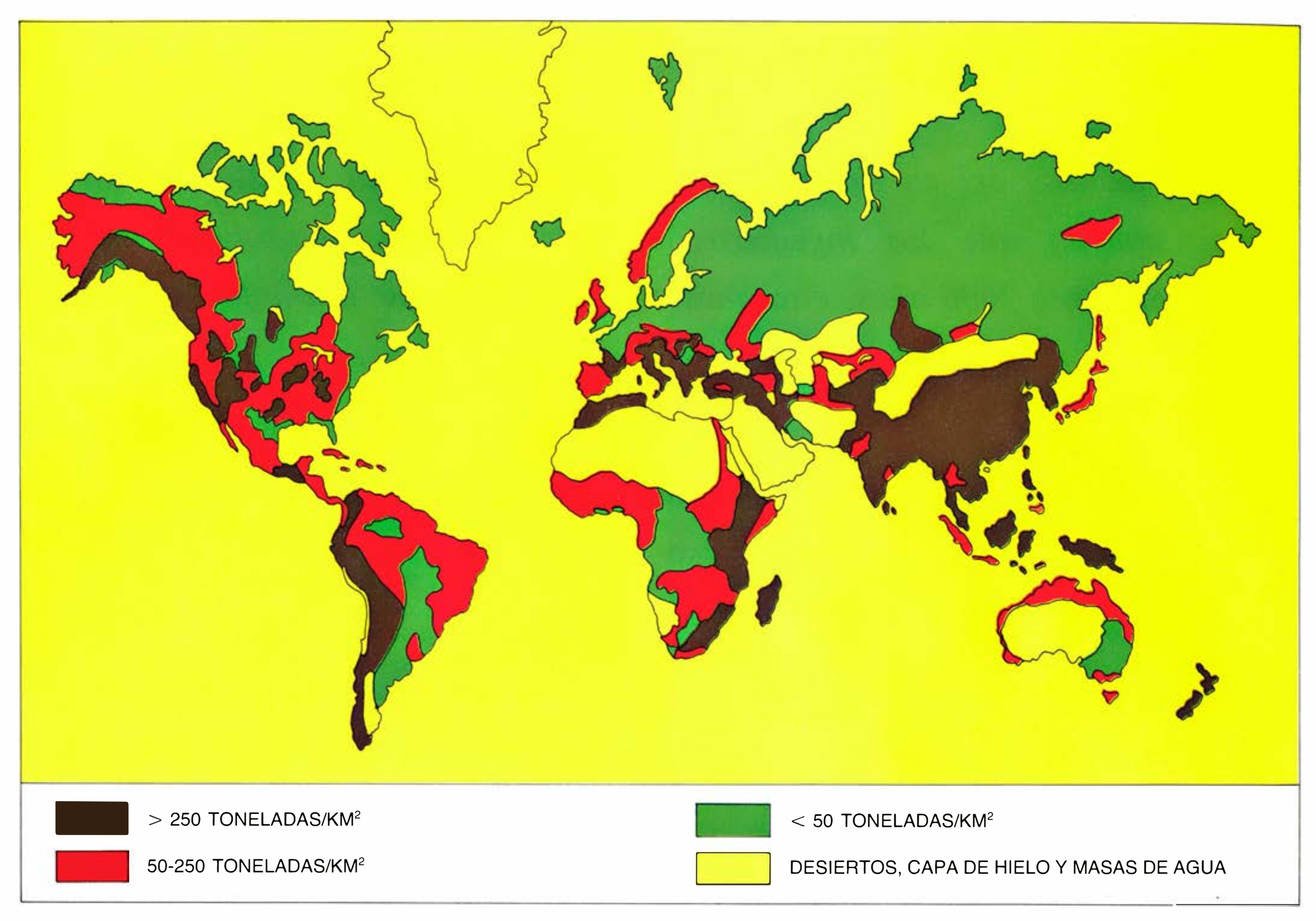
PRODUCCION DE SEDIMENTOS (Tn por Km²)
0 200 400 600 800
USO DEL TERRITORIO
CONDICIONES DEL CANAL
1820 1860 1900 1940 1980
FORESTAL — ESTABLE
AGRICOLA — ACUMULACION
INCISION
APROVECHAMIENTO FORESTAL Y PASTOREO — ESTABLE
CONSTRUCCION — ACUMULACION
INCISION
URBANO — EROSION DE LAS MARGENES

6. TASA DE EROSION EN UNA CUENCA. Depende del uso del suelo, probablemente más que de cualquier otro parámetro aislado. En este modelo, realizado por M. Gordon Wolman para una región de la zona atlántica central de Estados Unidos, al pie de los Apalaches, se propone una posible secuencia de usos del territorio y su relación con la producción de sedimentos a lo largo del tiempo, desde una fase pre-agrícola hasta llegar a un territorio completamente urbanizado. Al pasar de unas condiciones forestales al cultivo de la tierra, se incrementa sustancialmente la erosión, que decrece con el pastoreo o la explotación del bosque. Durante la etapa de construcción, al eliminarse la vegetación y la capa superficial del suelo, se dispara la producción de sedimentos, que vuelve a disminuir en la fase de urbanización final hasta alcanzar unos valores comparables con los de la fase pre-agrícola. En el gráfico también se ilustra el comportamiento del canal fluvial en función de las distintas condiciones antrópicas (es decir, las que han sido originadas por el hombre).

La expresión erosión acelerada sintetiza los efectos de la erosión antrópica. La erosión acelerada del suelo ocurre cuando se adopta un tipo inapropiado de uso del territorio o se modifican algunos de los factores de control de la erosión en el sentido de aumentar la misma. Estas modificaciones pueden ser directas e inmediatas, como cuando se arranca la cubierta vegetal en suelos altamente erosionables, se ara a favor de la pendiente o se construyen carreteras y autopistas, que disminuyen la capacidad de infiltración de la zona y se constituyen en vías alternativas de drenaje, obliterando los sistemas naturales de drenaje.

Otras veces, la actividad humana incide en los procesos erosivos de forma menos clara y a más largo plazo, como ocurre en sus complejas interacciones con el clima. En este sentido, avanzamos hacia un ensanchamiento de las zonas áridas subtropicales por el efecto del calentamiento atmosférico. Si la agricultura y el pastoreo se extienden hacia zonas marginales, con baja pluviosidad o suelos pobres, se agrava el problema, aumentando la erosión y acelerando la desertización.

España es el país de Europa más claramente afectado por el proceso de desertización. La degradación se debe sobre todo a fenómenos de erosión hídrica. Aunque los datos disponibles discrepan, algunas estimaciones consideran que de un veinticinco a más de un treinta por ciento de la superficie de España sufre fenómenos de erosión graves o fuertes; y una erosión moderada o apreciable afectaría a otra importante extensión, entre un treinta y más de un cuarenta por ciento. Climáticamente, la península Ibérica pertenece al dominio de la zona templada, recibiendo la influencia de las masas de aire subtropical marítimo, mediterráneo, continental y, sólo de forma marginal, las borrascas atlánticas de la circulación general atmosférica asociadas al frente polar. Pero la orografía incide de manera decisiva, al desviar y modificar los flujos de aire húmedo del nor-



7. MAPA DE LA EROSION EN EL MUNDO a partir de los datos de sedimentos en suspensión evacuados por los ríos. Las áreas con altas tasas de erosión incluyen regiones montañosas: Andes, Himalaya, Karakorum, parte de las Rocosas y las grandes fosas tectónicas africanas; abarcan también regiones de suelos volcánicos: Java, Papúa-Nueva Guinea, partes de Centroamérica, etcétera. El mapa revela una alta vulnerabilidad a la erosión en las regiones semiáridas y semihúmedas, especialmente en China, India, oeste de Estados Unidos, región mediterránea y parte central de la Unión Soviética. A pesar de cuanto hemos avanzado en el conocimiento de la carga de sedimentos en suspensión transportada por los ríos, existen muy escasas observaciones sobre la carga en disolución. La carga de fondo presenta grandes dificultades técnicas para su medición exacta. (La figura se ha inspirado en otra creada por Walling y Webb.)

te y noroeste, creando zonas pluviométricamente muy secas, como las grandes cuencas del Ebro, Tajo y Duero. Además, la situación de las cordilleras periféricas favorece la torrencialidad de las cuencas hidrográficas limitadas entre ellas y el mar. Con esta configuración, se establece una gran irregularidad en el régimen de precipitaciones, tanto espacial como temporalmente, con máximos pluviométricos en cuencas de vertiente atlántica y mínimos en las grandes cuencas y en la región mediterránea sureste. Sin embargo, los máximos de precipitación diaria se localizan en la vertiente mediterránea, encontrándose importantes valores en los índices medios anuales de p^2/P y $E.I._{30}$. Las condiciones semiáridas, e incluso áridas, de extensas zonas de las grandes cuencas y de parte de otras cuencas mediterráneas proporciona un equilibrio frágil para el desarrollo de la vegetación, que además ha desaparecido en gran medida a lo largo de los siglos por la intensa ocupación humana. Las avenidas e inundaciones se suceden, con especial importancia, en todo el este y sureste, y con ellas una gran movilización de material. La tectónica, generadora de relieves, ha dado lugar a una disposición preferentemente periférica de los mismos, con lo que se llega a situaciones climáticas, hidrológicas y de energía de relieve, en extensas áreas, altamente favorables a la erosión, acentuándose en algunos casos, como ocurre de forma especial en las Cordilleras Béticas, con la actividad neotectónica. Por otra parte, la importante extensión que ocupan los materiales arcillosos, principalmente en las grandes cuencas, así como distintas formaciones superficiales poco o nada consolidadas, favorecen los procesos de abarrancamiento por arroyada y el desarrollo de áreas de *badlands*.

Quedan importantes problemas teóricos por resolver en el campo de la erosión; entre ellos, el perfeccionamiento de modelos físicos y matemáticos para estimar y predecir la magnitud de la erosión y sedimentación, ahondar en el conocimiento de los procesos fluviales o aclarar la influencia de los distintos factores en el índice real de la erosión del suelo. Pero la tarea más ardua será la de búsqueda de las formas de usos del territorio que menos incidan en la aceleración de los procesos de erosión natural y en las de protección y recuperación de los espacios que ya están gravemente amenazados.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

ASSESSMENT OF EROSION. M. De Boodt y D. Gabriels (editores). John Wiley and Sons Ltd.; Chichester, 1980.

EROSION AND SEDIMENT YIELD: SOME METHODS OF MEASUREMENT AND MODELLING. R. F. Hadley y D. E. Walling (editores). Geo Books; Norwich, 1984.

SOIL EROSION AND CONSERVATION. R. P. C. Morgan. Editado por D. A. Davidson. Longman Scientific and Technical; Harlow, 1986.

Acueducto romano de Nîmes

Nuevos análisis del en un tiempo magnífico sistema de abastecimiento de aguas indican que los ingenieros de estructuras e hidráulicos que lo diseñaron, hace 2000 años, eran más expertos de lo que normalmente se cree

George F. W. Hauck

Cualquier día cálido y soleado en el sur de Francia encontrará a miles de curiosos pasando por un puente de 240 años de edad, que atraviesa el río Gardon o Gard, cerca de la ciudad de Nîmes. La mayoría de estos visitantes prestan poca atención al chispeante río, al delicioso valle del Gardon o incluso al viejo edificio sobre el que caminan. Antes bien, se vuelven para contemplar un espectáculo único: el famoso Pont du Gard, un puente paralelo al otro, de dieciséis pisos de altura (48,77 metros), cuyos tres órdenes de arcos de cantería fueron levantados allí, hace unos 2000 años, por obreros del imperio romano.

En la primavera de 1985 trepé por el antiguo monumento como el más intrépido de los jóvenes turistas, pero mis razones para examinar el puente, elemento importante del acueducto que antaño suministraba agua a Nîmes –la colonia latina de Nemausus–, eran más profesionales que de recreo. Como ingeniero, estaba yo calculando el valor del puente y de otros restos del acueducto, para determinar hasta qué punto los componentes de ese sistema de abastecimiento de aguas estaban bien diseñados.

Suele repetirse que los ingenieros romanos eran prácticos que modificaban cautelosamente diseños consagrados, con escasa preparación teórica para abordar, por ejemplo, la geometría que haría óptima la velocidad del agua en una tubería, o cuánta masa necesitaría un puente para contrarrestar la capacidad del viento para volcarlo. Tienen fama también de haber sido excesivamente conservadores, compensando su falta de conocimientos mediante proyectos de edificios más resistentes y, por tanto, más costosos de lo que sabemos hoy que era necesario.

Sin embargo, el Pont du Gard, con su extraordinaria altura y majestuosas arquerías, supuso un paso de gigante respecto a todo lo que los romanos habían hecho con anterioridad. Esta valentía revelaba que los ingenieros romanos podían haber sido más entendidos y audaces de lo que suele escribirse. Y lo fueron. Los cálculos que hice por cuenta propia y en compañía de Richard A. Novak, antiguo colega mío en la Universidad de Missouri, delatan una capacidad sorprendente, por parte de los proyectistas hidráulicos e ingenieriles, del acueducto de Nemausus.

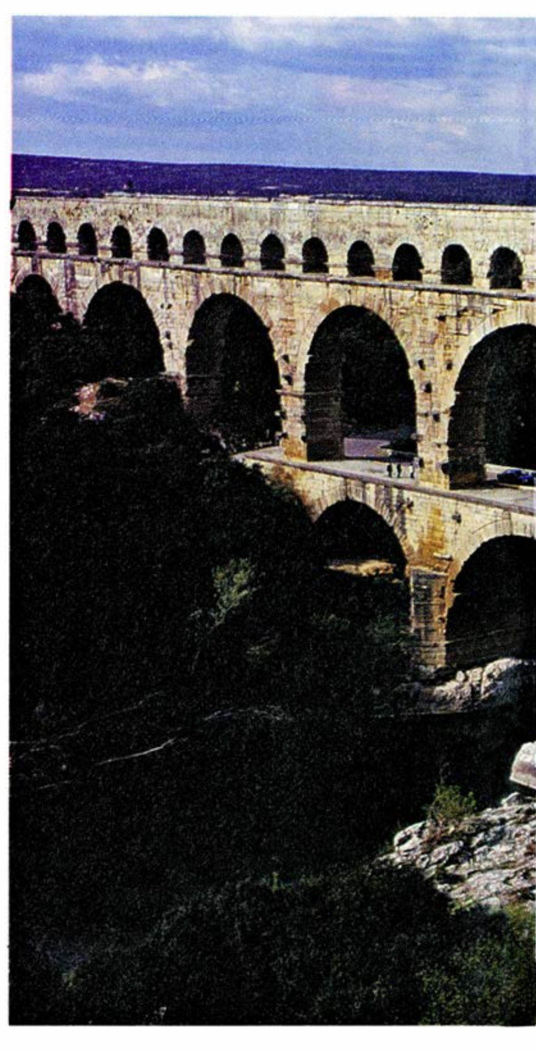
Durante mi estancia en Francia, recibí valioso auxilio de Jean-Luc Fiches, del Centre National de la Recherche Scientifique. El y otros investigadores que trabajaban bajo su dirección me ayudaron a analizar el Pont du Gard y otros restos del acueducto, mientras se ocupaban de realizar un levantamiento fotométrico de estas construcciones. También me hicieron el honor de permitir que les ayudase.

El acueducto que estuvimos midiendo con tanto cuidado en 1985 conducía agua en su día, mediante la fuerza de la gravedad, desde manantiales próximos a la aldea de Ucetia (hoy Uzès) hasta una ladera de Nemausus, donde un "castellum", o depósito circular, la recogía. Desde éste, el agua fluía hasta alturas menores a través de diez grandes tuberías de distribución.

La documentación disponible indica que el acueducto fue construido en el 19 a. de C. por Marco Agripa, amigo de toda la vida y colega de César Augusto. Estratega militar y eficaz administrativo, Agripa era también un magnífico ingeniero y el principal realizador de muchas obras públicas del imperio, en especial de sistemas de abastecimiento de aguas. Se sabe que estuvo en Nîmes o en sus cercanías por entonces.

En el 19 a. de C., la población de Nemausus, de unos 50.000 habitantes, necesitaba un mejor abastecimiento de agua. De Siria a España, desde el Mar del Norte hasta el Sáhara, los pueblos del imperio disfrutaban de una edad de

GEORGE F. W. HAUCK, doctor en ingeniería estructural por la Universidad de Northwestern, da clases de ingeniería civil en la de Missouri en Kansas City, donde su especialidad es la historia de su profesión. Siguiendo la filosofía de George Santayana, Hauck afirma que "los ingenieros que ignoran el pasado poco pueden hacer por el futuro".



1. EL PONT DU GARD era un nexo fundamental en el acueducto de Nîmes. Llevaba el agua a través de una profunda garganta, el valle del Gardon, y atravesaba el río del mismo nombre en la hondo-

oro de la ingeniería civil. Los romanos construían carreteras, puentes, alcantarillas, teatros, estadios y, naturalmente, magníficos balnearios públicos. Estos últimos, elemento básico de la vida social romana, requerían un suministro de agua limpia de proporciones comparables a las de las ciudades modernas. El agua proporcionada por los manantiales y pozos locales no hubiera satisfecho probablemente su creciente demanda y sólo un acueducto lo lograría.

Sin embargo, construir un acueducto para Nemausus no iba a ser tarea fácil. El proyecto, con sus tremendas dificultades, hubo de ser, es lógico imaginarlo, obra de alguien de la talla de Agripa. Los manantiales próximos a Ucetia suministraban agua en una proporción de alrededor de 600 litros diarios por habitante de Nemausus. Era bastante. Pero el camino más corto desde Ucetia a Nemausus, a vuelo de pájaro unos 20 kilómetros, constituía una carrera de obstáculos de colinas y barrancos que hubieran requerido, por lo menos, un túnel de ocho kilómetros de longitud, imposible de hacer; muchos siglos habían de pasar hasta que se construyeran túneles de esa longitud. Un rodeo hacia el oeste estaba excluido por causa de otras colinas. La única solución razonable era un desvío hacia el este en forma de herradura.

Este camino evitaba muchas colinas, pero significaba que el acueducto había de tener cincuenta kilómetros de longitud, cruzar el profundo valle del Gardon, atravesar o rodear agrestes afloramientos de piedra y salvar zonas pantanosas. Uno de los problemas más arduos lo presentaba la altura relativamente baja de las fuentes, apenas diecisiete metros por encima del castellum. Mientras trazaban los túneles o puentes con que salvar los formidables obstáculos, Agripa y sus ayudantes —cuyo instrumental se limitaba a niveles rudimentarios, tableros aritméticos, tabletas de cera y el cerebro humano— tenían que descubrir el modo de conservar la inclinación, ligerísima, del canal: apenas 0,34 metros por kilómetro (la diferencia de 17 metros de altura entre Ucetia y Nemausus, dividida por los 50 kilómetros de canal). Una pendiente así es imperceptible a la vista, y un pequeño error hubiera producido trechos llanos donde el agua se habría estancado.

Los ingenieros romanos atinaron. Pero yo me preguntaba si serían capaces de garantizar que el agua discurriese eficazmente por el canal con el mínimo impedimento. Una hazaña de ese porte habría sido realmente notable, considerando que las fórmulas matemáticas en que hoy se basan los ingenieros para trazar cañerías de agua controladas por la gravedad no se inventaron hasta el siglo XIX.

Con la ayuda de Novak calculé el rendimiento del flujo del agua determinando la profundidad normal de la misma en distintas partes del canal. Sabíamos que la profundidad ideal era igual a la mitad de la anchura del canal, porque con ese nivel la cantidad de agua que roza la superficie del canal,



nada. El puente, notable por su belleza y antigüedad, destaca asimismo por razón de su tamaño: cerca de 49 metros de alto, tanto como un edificio de 16 pisos, y 275 metros de longitud. Los romanos, que nunca construyeron otro puente más elevado, alcanzaron la altura deseada superponiendo tres arquerías. La inferior tiene seis arcos, mide 21,87 metros de alto y 6,36 metros de ancho; la arquería intermedia, con sus 11 arcos, mide 19,50 metros de alto y 4,56 metros de ancho, y la superior, que soporta el enorme canal de cemento por donde corre el agua, mide 7,40 metros de altura y 3,06 metros de anchura.

en relación con el volumen de agua de la acequia (y por tanto la fricción entre el curso de agua y las superficies), quedaría reducida al mínimo.

La profundidad se puede determinar conociendo la lisura, la geometría y la inclinación del canal, así como la proporción con que el agua penetra en él desde la fuente. Por suerte, conocíamos todos estos factores. Sabíamos, por ejemplo, que el canal era completamente liso. De acuerdo con la costumbre romana, iba bajo tierra siempre que era posible. Los obreros abrían una zanja, ponían un piso de cemento, levantaban paredes de cantería y las revestían de una capa de cemento de *maltha* rosácea: un revoco, suave e impermeable, compuesto de cal, grasa de cerdo y zumo de higos sin madurar, parecido al látex. Después techaban la obra con una bóveda de medio cañón de piedra y rellenaban la zanja.

También sabíamos que la sección transversal del verdadero conducto del agua –el piso y las paredes (excluyendo la bóveda)– era generalmente un cuadrado abierto, que medía 1,2 metros de lado; la altura total del canal, ahora incluida la bóveda, era de 1,8 metros, altura suficiente para que los encargados del mantenimiento pudieran ponerse de pie después de entrar por las escotillas situadas a intervalos regulares a lo largo del recorrido del canal. En los sitios en que la conducción se remontaba por el aire, como en Pont du Gard, el canal era rectangular; los obreros hacían más altas sus paredes y las cubrían de grandes losas horizontales que resistían los efectos de la intemperie mejor que las bóvedas de cantería.

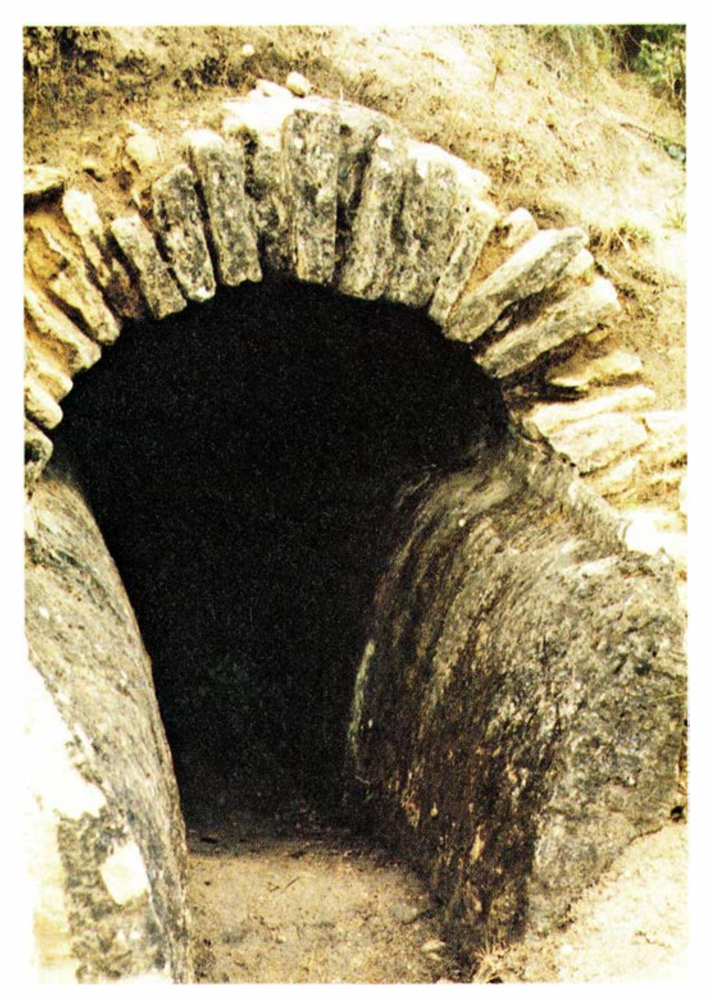
Por razones económicas a que me referiré más adelante, la pendiente ascendía a 0,67 metros por kilómetro en el tramo de más arriba del Pont du Gard, pero a sólo 0,187 metros por kilómetro en el tramo de abajo, donde variaba de 0,07 a 0,30 metros por kilómetro. Basándonos en cálculos hidrológicos modernos, dedujimos que las fuentes próximas a Ucetia suministraban agua en una proporción que oscilaba entre 210 y 450 litros por segundo, con una media de unos 350 litros por segundo.

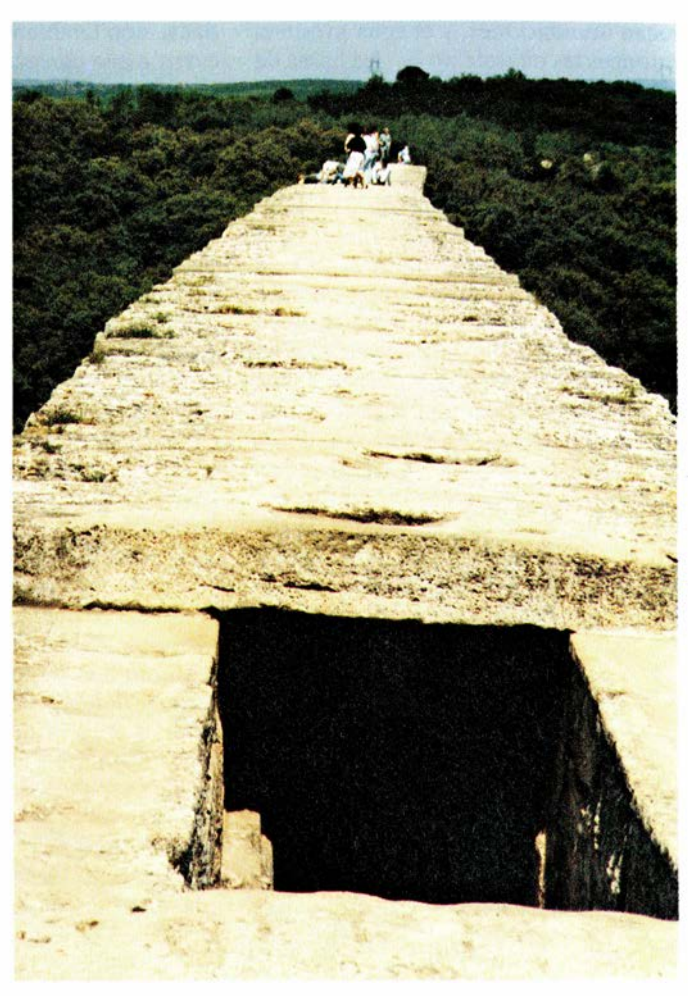
Ni los proyectistas ni nosotros teníamos que preocuparnos de la profundidad del agua en el tramo superior del canal. Decidieron evidentemente hacer allí la pendiente más pronunciada que la media, para reducir todo lo posible la altura del Pont du Gard y de las construcciones contiguas, aminorando así tanto los costos como el riesgo de fracaso. (Aun con su altura disminuida, el puente era el de mayor luz que los romanos construyeron o que habían de construir.) Sin embargo, tuvieron que pagar el precio del ahorro de altura: hacer el primer tramo del canal más inclinado que la media significaba que la pendiente del tramo siguiente al Pont du Gard había de ser más horizontal que la media (lo que explica por qué la pendiente es allí especialmente leve).

¿Cómo fluía el agua por el crítico tramo inferior de la conducción? Se desplazaba de modo muy eficaz, según nuestros cálculos de nivel. Comprobamos que la profundidad de la corriente era casi óptima (0,6 metros) en determinadas condiciones. Por ejemplo, cuando el mínimo de agua fluía por el canal, su profundidad en el sector más llano, justamente después de pasado el Pont du Gard, era ideal: lo era también a su máximo flujo en el sector de mayor pendiente (el último), exactamente antes de que el canal llegase al castellum. La fórmula derivada que aplicamos empíricamente, conocida como fórmula de Manning, proporcionaba, además, un nivel de agua calculado de 0,6 metros para la pendiente media (0,187 metros por kilómetro) de todo el tramo subsiguiente al puente, durante los períodos de flujo medio, cifra en la que habrían puesto particular cuidado los constructores.

Consideramos también la posibilidad de que el canal corriese alguna vez el peligro de rebosar: que el agua subiera a la zona situada por encima del cuadrado de 1,2 metros, ocasionando filtraciones o congestionando el espacio de respiración de los encargados del mantenimiento. Descubrimos que no había tal peligro. Donde el canal era más horizontal, es decir, donde se esperaría que la velocidad del agua corriente disminuyese y el nivel llegase al máximo, la parte cuadrada era justamente lo bastante amplia para recibir el agua expelida por los manantiales en las fases de su mayor productividad.

2. CURSO DEL ACUEDUCTO (*rojo*). Empezaba en los manantiales que había cerca de la aldea de Ucetia (la actual Uzès). Desde allí seguía un camino en herradura, de 50 kilómetros de largo; primero se dirigía al sudeste, hacia el Pont du Gard, después al suroeste, pasando por los actuales St. Bonnet y St. Gervasy, hasta Nemausus (la Nîmes antigua). El agua se derramaba en un castellum circular, o depósito colector, de una ladera de Nemausus y desde allí descendía a alturas menores por 10 cañerías de plomo. El camino más corto, que hubiese llevado al acueducto hasta Nemausus, se desechó porque se interponían altas montañas.







3. SEGMENTO SUPERVIVIENTE del canal del agua (*izquierda*), cubierto de adherencias de calcio. Es típico; la mayor parte de la conducción tenía la misma forma y corría bajo tierra. El área destinada a contener el agua medía 1,2 metros cuadrados; la altura del canal, incluida la bóveda, medía 1,8 m, lo bastante para dar cabida a los obreros de mantenimiento. Donde la conducción iba elevada, las paredes superaban los 1,2 m y se sustituía la bóveda por losas.

Cuesta imaginarse cómo un canal que tenía que ser relativamente fácil de construir y de mantener podría haberse diseñado mejor.

Si extraordinario era el canal, el Pont du Gard no le andaba a la zaga; no sólo por su aspecto de encaje, que disimula la masa de las piedras de seis toneladas de que está hecho, sino también porque ha conseguido mantenerse en pie todos estos siglos. El volteo de las arquerías está perfectamente calculado, es cierto: el orden inferior es mayor y más pesado que el orden intermedio, que a su vez es mayor y más pesado que el orden superior, sobre el que descansa el canal. Sin embargo, el valle que el puente atraviesa es famoso por la intensidad de sus vientos, y el río que pasa por debajo está sujeto a notables crecidas de primavera. Es de suponer que los ingenieros no tuvieran medio de calcular las tensiones demoledoras ocasionadas por los vientos y las crecidas. Estas fuerzas no se conocen bien ni siquiera hoy. Y uno se pregunta: ¿resolvieron el problema amparándose en una excesiva cautela?

Para dar respuesta a esta pregunta calculé las velocidades del viento y las fuerzas asociadas con ellas que serían necesarias para separar, aunque sólo fuera ligeramente, las juntas de la cantería en cualquier parte del puente. Las juntas son la parte más delicada del edificio y la separación o grieta sería la señal del desmoronamiento inminente del puente. Comparé luego aquellos vientos con los que son típicos de la comarca.

La operación conllevaba calcular la dirección y magnitud de las fuerzas del viento que podrían actuar sobre una sola montea durante tormentas de intensidades variables. (Llámase montea a un segmento representativo del puente: un arco del orden inferior y toda la cantería que hay encima del mismo en los otros órdenes.) Después, calculé la tensión (el empuje ascendente, en este caso) que se podría esperar produjesen las fuerzas del viento en el lado de barlovento de la montea, así como las fuerzas compresivas (descendentes) que el viento desataría en el lado de sotavento [*véase la figura 5*]. También calculé las tensiones compresivas resultantes del peso de la cantería sobre cualquier zona determinada, porque las tensiones compresivas de la cantería contrarrestan los esfuerzos de tracción producidos por el viento, limitando así el efecto de sustentación de éste. Se trata de un principio fácil de ilustrar: una pila de ladrillos pesados es capaz de resistir un empuje considerable desde un lado, mientras que una pila de ladrillos de gomaespuma se derrumba con el chasquido de los dedos.

Operaba yo sobre el supuesto de que, dondequiera que la tensión fuese mayor que la compresión, se produciría la separación de las juntas de cantería. Esta separación puede asociarse a la sustentación de la parte de barlovento de una capa de cantería con respecto a la capa de abajo, como si se insertase entre ambas una cuña de aire. La fuerza del mortero no entraba en litigio, porque no se hizo uso de éste. Los cálculos indicaban que las bases de las pilas (las columnas que sostienen los arcos) del orden intermedio del puente son las más susceptibles de tensión, pero sólo poco más que las pilas del nivel inferior. Cuando las tormentas pro-

vocan inundaciones, y el agua presiona entonces las pilas de abajo, las bases de estas pilas corren el mismo peligro que las pilas del orden intermedio.

Para estos dos órdenes de pilas observé que hacía falta vientos huracanados de una velocidad de 215 kilómetros por hora a ras del suelo, para que se produjese una tensión neta en las bases de los órdenes intermedio e inferior. Ahora bien, en la mayoría de las tormentas de la zona, los vientos no alcanzan velocidades por encima de los 150 kilómetros por hora y ejercen una presión de viento que raramente supera la mitad de la de los vientos de 215 kilómetros por hora. Los romanos construían, pues, con un margen de garantía de aproximadamente dos, contra la apertura de grietas, factor que es a la vez razonable y equivalente a los márgenes típicos hoy en uso.

Los romanos sabían calcular el peso de la cantería. Pero considerando que debieron andar algo inseguros al calcular los efectos del viento con exactitud, maravilla que alcanzasen soluciones tan razonables para los dos órdenes. Resulta obvio que los ingenieros de estructuras, lo mismo que sus colegas hidráulicos, no sólo tenían que hacer frente a formidables inseguridades para llevar a cabo la tarea encomendada, sino también que lo hacían sin recurrir a una construcción dispendiosa y excesiva.

Al igual que el Pont du Gard, gran parte de su castellum ha sobrevivido al paso de los siglos y encierra ciertas claves para inferir la lógica de sus constructores. Ha desaparecido el edificio que cubría el depósito circular, pero el depósito en sí es una de las construcciones mejor conservadas en su género. Mide casi seis metros de diámetro y 1,4 de profundidad. Las ranuras existentes al pie y a los lados de la compuerta de 1,2 metros cuadrados (por donde el agua pasaba del canal al depósito, revestido de *maltha*), unidas a los agujeritos de las placas de piedra de encima de la compuerta, sugieren la presencia de algún tipo de puertas ajustadas que daban entrada al depósito.

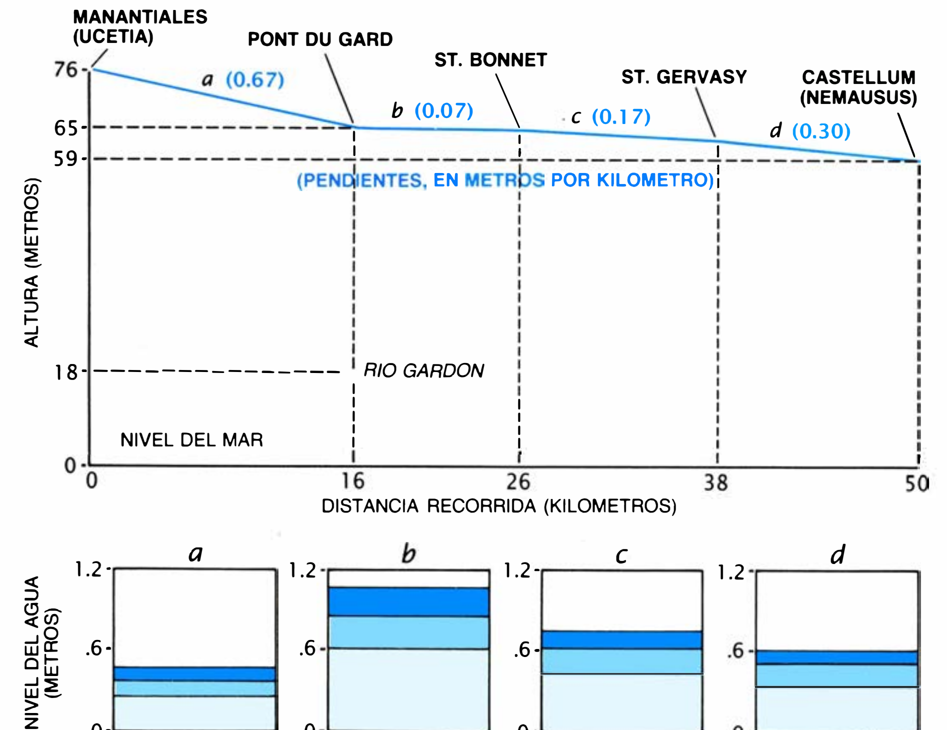
Durante su funcionamiento normal, el agua del depósito pasaba a las diez tuberías de distribución, cuyas posiciones y diámetros, de 0,3 metros, están todavía señaladas por los agujeros que penetran en la pared del depósito. Las tuberías eran de plomo, cuya toxicidad se conocía, si bien se podía tolerar porque el agua, bastante dura, formaría pronto sobre ella una cubierta protectora de calcio. El agua podía extraerse por medio de tres agujeros abiertos en el suelo, dotados de válvulas que permanecían cerradas durante las operaciones normales. Estos agujeros de drenaje medían también unos 0,3 metros de diámetro. Es de suponer que el agua fuese a parar a una alcantarilla.

Novak y yo iniciamos nuestro examen del diseño del castellum explorando el rendimiento hidráulico de las tuberías de distribución. Observamos que, cuando la entrada de agua en el depósito llegaba al máximo, las tuberías de plomo de distribución la hacían discurrir a media altura (la óptima para una cañería circular), de modo que, una vez más, la eficiencia era máxima.

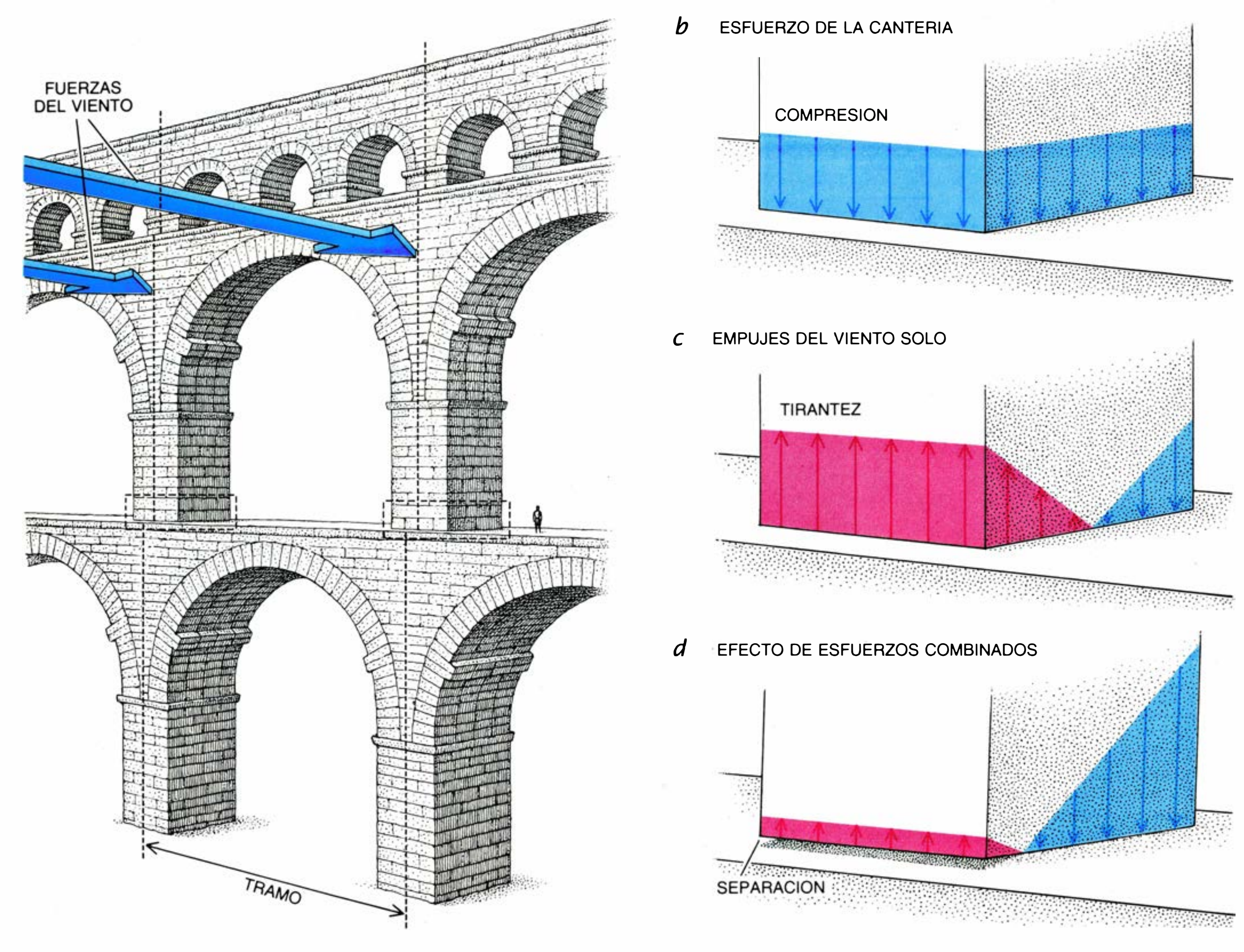
Nos ocupamos luego de algunas cuestiones que tenían planteadas, desde hace tiempo, los arqueólogos: ¿para qué servían las puertas de la compuerta de entrada?, ¿cómo funcionaban?, ¿por qué los ingenieros instalaron tres grandes desagües, en vez del acostumbrado, uno y pequeño?

En cuanto a las puertas, descartamos inmediatamente la vieja hipótesis según la cual servían de válvula para controlar la entrada de agua en el depósito. Con esa teoría no se puede represar el agua, porque la bóveda del canal no la contendría. En el supuesto de que el flujo del agua de las fuentes continuase, el sistema de puertas que obturase eficazmente la entrada del agua al depósito (siempre que tal sistema fuese posible) hubiese hecho retroceder el agua y acumularse en el canal, hasta que acabase filtrándose por la bóveda permeable, en sitios donde la filtración podría causar mucho daño. Más probable es, como otros han sugerido, que se asignase a las puertas la misión de medir el flujo del agua en un momento dado. Como excelentes administradores del suministro de agua, a los romanos no se les hubiera pasado por alto la necesidad de un contador.

Novak y yo analizamos varios dispositivos posibles; encontramos el que, en nuestra opinión, aparecía más probable. Se trataba de una esclusa (un dispositivo por el que el agua fluye por debajo de una puerta); algo que era sencillo de manejar y sensible a las variaciones de flujo. Nuestros resultados indican que los ingenieros romanos entendían un principio que se ha creído en general que había sido descubierto por los ingenieros hidráulicos del siglo XIX. Conocido el tamaño de una abertura subacuática, por la que el agua pasa de un canal a un depósito, y conocida también la cabeza (la diferencia entre el nivel del agua del depósito y el nivel del canal), se puede determinar la tasa de flujo. Nosotros creemos que los



4. GRAFICO del alzado del canal en función de la distancia de su recorrido (*arriba*). Nos muestra el declive extraordinariamente leve del canal. La pendiente media era de 0,34 metros por kilómetro (la diferencia de 17 metros de altura entre las fuentes y Nemausus, dividida por los 50 kilómetros de canal), pero la pendiente real variaba (*números entre paréntesis*). Aunque el canal era relativamente horizontal, la profundidad del agua —indicadora del rendimiento del curso— era muchas veces óptima (0,6 metros), o casi, en cualquier parte del canal. Las profundidades de los segmentos principales del canal se indican (*abajo*) para épocas en que la tasa de flujo de los manantiales era baja (*azul claro*), normal (*azul intermedio*) y alta (*azul oscuro*). Obsérvese, en particular, que la profundidad era óptima en el segmento más llano (pasado el Pont du Gard) durante el flujo mínimo, y volvía a ser óptima en el segmento final durante el flujo máximo.



5. EFECTO DE LAS FUERZAS DEL VIENTO en un tramo o sección representativa del Pont du Gard (*a*). Se calculó con objeto de determinar qué partes del puente eran más propensas a la separación de las juntas de cantería. Los resultados mostraron que las bases de las pilas (pilares) de la segunda arquería (*rectángulos punteados*) eran las más propensas, y que hacía falta velocidades de vientos superiores a unos 215 kilómetros por hora para separar las bases de sus asientos. Se ha calibrado la velocidad crítica del viento (*serie de la derecha*) calculando los empujes compresivos, o descendentes (*azul*) producidos por la cantería (*b*), calculando los esfuerzos de tensión o ascendentes de sustentación (*rojo*) producidos por vientos de velocidades varias (*c*) y calculando, por último, los esfuerzos netos de la zona vulnerable. La separación se produce cuando los esfuerzos de tensión vencen las fuerzas de compresión de la cantería.

romanos diseñaron lo que vendría a ser un sistema de puertas de cabeza constante [*véase la figura 6*]. Es decir, obligaban a la cabeza a tener un tamaño fijo, medían el tamaño del orificio (variable), necesario para producir la cabeza deseada, y a partir del orificio deducían la tasa de flujo.

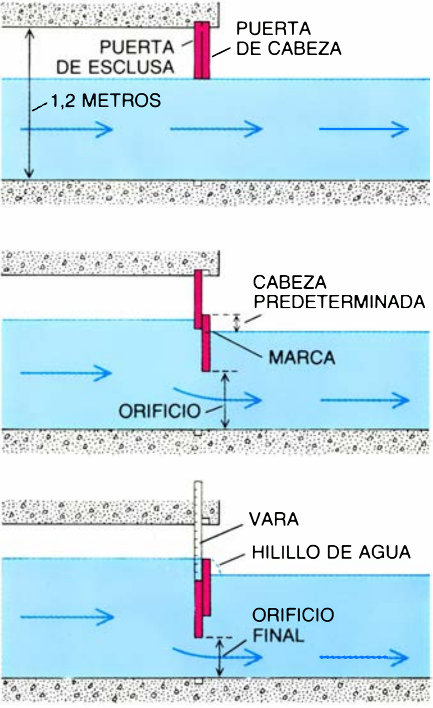
La esclusa constaba de dos puertas, tan anchas como el canal aunque en altura no llegaban a la mitad de éste: una estaba colocada directamente detrás de la otra. Imaginamos que de noche no se hacía medición alguna y, por tanto, las dos hojas permanecían levantadas; el nivel del agua en el depósito era el mismo que en el canal. Por la mañana, el guardián, o *castellarius*, ataba unas cuerdas, que pasaban por las aberturas de las piedras de lo alto del canal, para hacer bajar la puerta delantera (llamémosla puerta de cabeza), hasta que una señal que había en dicha puerta quedase en línea con el nivel de agua del depósito. Eso dejaba el borde superior de la puerta a una altura prestablecida (la altura de la cabeza que se deseaba tener), sobre el nivel del agua del depósito. La puerta trasera (llamémosla puerta de esclusa) se bajaría entonces para reducir con ello el tamaño del orificio subacuático y haciendo subir de nivel el agua situada detrás de las puertas.

El operario continuaría bajando despacio la puerta de esclusa hasta que sólo un hilillo de agua pasase al depósito por encima de la puerta de cabeza, prueba de que el agua del canal estaba a ras del borde superior de la puerta de cabeza y, por tanto, indicaba que la cabeza tenía la altura deseada. En este punto, el *castellarius* podía leer la altura del orificio, en una vara de medir conectada con la puerta de esclusa, y multiplicar por un factor fijo para determinar la tasa de flujo; es incluso posible que la vara estuviese calibrada para denunciar directamente la tasa de flujo.

Creemos que el modelo de la cabeza constante es la más probable entre distintas soluciones posibles, porque se ajusta al enigmático registro arqueológico, proporciona lecturas muy ajustadas, resulta fácil de manejar y constituye la única opción razonable en la que las lecturas muestran una relación lineal con la tasa de flujo. A los constructores romanos les hubiera agradado la ventaja de una relación tan simple y fiable. Además, las puertas que imaginamos hubieran servido también para otro fin, distinto de la medición, que afecta al funcionamiento de los en un tiempo misteriosos desagües.

En lo que a estos desagües se refiere, la razón de su número y de su tamaño reviste quizá menos complejidad de lo que se ha creído. Para que alguien lim-





6. PRESENTABA EL CASTELLUM dos puertas ajustables (*izquierda*), donde el canal desembocaba en el depósito (*abertura cuadrada, al fondo, derecha, debajo del arco tapiado*). Las puertas, que al parecer colgaban una detrás de otra (*derecha*), podrían haber medido la tasa de flujo en el interior del canal, valor derivable de la cabeza —diferencia entre el nivel de agua en el depósito y el nivel de agua en el canal— y del tamaño del orificio subacuático donde el agua entraba en el depósito. Un obrero accionaba las puertas, a partir de su posición alzada, de plena fluencia (*arriba*), y las disponía de suerte que la cabeza alcanzase determinada altura. Bajaba para ello la puerta delantera, o de cabeza, hasta que una marca, colocada a cierta distancia de lo alto de la puerta (igual a la cabeza que se deseaba), alcanzaba el nivel del agua del depósito (*centro*); después bajaba gradualmente la puerta trasera, o de esclusa, hasta que sólo un hilillo de agua llegara al depósito por encima de la puerta de la cabeza, indicando que la cabeza estaba ahora a la altura deseada (*abajo*). Se podía entonces determinar la tasa de flujo leyéndola en una vara ajustada a la puerta de esclusa o bien leyendo la medida señalada en el orificio final y multiplicándola por algún factor.

piase o reparase el depósito, habría que vaciar el agua almacenada en su recinto. En el pasado, los arqueólogos suponían que el aflujo del agua al depósito podía interrumpirse indefinidamente, dando a los operarios tiempo ilimitado en espera de que el depósito se vaciase. Para eso bastaría con un orificio pequeño. Pero si no había un medio práctico de cerrar la entrada del agua durante mucho tiempo —como ocurría casi con entera seguridad—, un desagüe solo y pequeño hubiera sido insuficiente. Ante esas condiciones, la existencia de varios desagües grandes aseguraría, de modo ingenioso, que el depósito se vaciara hasta casi el fondo mientras el agua continuaba entrando en él, o que se vaciase del todo cuando el aflujo quedaba suspendido.

Cuando el flujo normal era bajo, la mera apertura de todos los desagües reducía el nivel de agua a la altura de los tobillos. Si los obreros querían drenar por completo el depósito, bastaba con que levantaran las puertas al mismo tiempo que abrían los desagües grandes, esperaran que el nivel del canal descendiese y cerraran después la compuerta. Esta operación vaciaría el agua del depósito en medio minuto, tras el cierre de las puertas; con un flujo bajo, el agua quedaba retenida detrás de las puertas el tiempo suficiente para garantizar que el fondo del depósito permaneciese seco durante unos 20 minutos; daba tiempo para barrer el piso o hacer reparaciones menores.

Uno a uno, los descubrimientos relativos al trazado del acueducto resultan sorprendentes. Vistos en conjunto, revelan, por su carácter imponente, que los ingenieros romanos o tenían mucha suerte o, más probable, poseían una formación muy superior a la que se les quiere reconocer. ¿Cuánto tiempo cumplió el acueducto la función que tenía encomendada? Operó satisfactoriamente cuatro siglos. Cuando la civilización romana se debilitó y el mantenimiento del acueducto entró en declive, el canal se fue cubriendo de una costra de depósitos de calcio; en el siglo octavo el conducto estaba tan obstruido, que era prácticamente inutilizable. Con el paso del tiempo, las guerras y los terremotos destruyeron tramos del acueducto y la gente se dedicó a quitar la piedra y el plomo para otros destinos.

El Pont du Gard también sufrió mucho, sobre todo durante la Edad Media, cuando alguien tuvo una de las ideas más descabelladas de la historia de la tecnología: reducir hasta un extremo peligroso los pilares del segundo orden para hacer un paso peatonal por encima del orden inferior. La desafortunada carretera continuó en uso hasta que el puente anejo, que ahora acoge a dos millones de visitantes al año, fue construido por Henri Pitot en 1740. Sin embargo, el puente original no se reparó debidamente hasta 1855, en que el emperador Napoleón III dispuso una restauración a fondo. Hoy el Pont du Gard se alza como elocuente testigo del espíritu creador y emprendedor de los romanos.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

STRUCTURAL DESIGN OF THE PONT DU GARD. George F. W. Hauck en *Journal of Structural Engineering*, vol. 112, n.º 1, págs. 105-120; enero de 1986.

INTERACTION OF FLOW AND INCRUSTATION IN THE ROMAN AQUEDUCT OF NÎMES. George F. W. Hauck y Richard A. Novak en *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 113, n.º 2, págs. 141-157; febrero de 1987.

THE AQUEDUCT OF NEMAUSUS. George Hauck. McFarland & Company, Inc., 1988.

WATER FLOW IN THE CASTELLUM AT NÎMES. George F. W. Hauck y Richard A. Novak en *American Journal of Archaeology*, vol. 92, págs. 393-407; julio de 1988.

Taller y laboratorio

Mantener el movimiento de un columpio: lección primera de la mecánica de rotación

Jearl Walker

Cumplida cierta edad, el niño es capaz de subirse al columpio y aprender por sí mismo, mirando lo que hacen los demás, cómo ponerlo en movimiento y cómo "empujarse". Lo que no quiere decir que la explicación de los principios físicos del columpio sea un juego de infantes. ¿Cómo iniciar el movimiento si no es apoyándose en el suelo para impulsarse o sin que alguien empuje? ¿Y cómo aumentar luego la amplitud (o sea, el ángulo barrido al balancearse) estando de pie o sentado en el columpio?

Aunque se trata de un pasatiempo muy antiguo, lo cierto es que se prestó escasa atención a sus principios mecánicos hasta 1968, en que Peter L. Tea, Jr., y Harold Falk, del City College de la Universidad municipal de Nueva York, publicaron un estudio acerca del tema. Se limitaron al caso de una persona de pie sobre un columpio que ya haya iniciado el movimiento. Quizás el lector haya aprendido de pequeño que podemos aumentar la amplitud permaneciendo en pie y agachándonos en sincronía con el movimiento del artefacto, poniéndonos derechos al pasar por el punto más bajo y agachándonos al llegar a los más altos. Si el columpio no cuelga de cuerdas o cadenas, sino de soportes rígidos, y perseveramos en el intento, podríamos balancearnos hasta alcanzar una altura superior a la de la barra de suspensión. De hecho, si los enganches de los soportes a la barra lo permiten, podríamos incluso acabar describiendo círculos completos; hay trapecistas que lo hacen.

¿Por qué aumenta la amplitud del balanceo con el truco de erguirnos y agacharnos? Ya señalaron Tea y Falk que en ello intervienen varios factores, pero reviste suma importancia lo concerniente a la energía y lo que hagamos para aumentarla. Imaginémonos en un columpio suspendido de cuerdas y prescindamos de las pérdidas energéticas por rozamiento y por la resistencia del aire [*véase la figura 1*]. Supongamos que nos agachamos al llegar al punto más alto por detrás. En ese preciso instante nuestra energía es totalmente potencial, y depende de la altura de nuestro centro de masa con respecto a una cota de referencia. Fijaremos ésta en el punto más bajo del arco descrito por nuestro centro de masa; supongamos que el centro se halla ahora a dos metros por encima de ese nivel.

A medida que descendemos, la energía se transforma gradualmente en energía cinética y aumenta la velocidad. Al llegar al punto más bajo, nuestra energía es exclusivamente cinética y nos movemos a la máxima velocidad. Cuando iniciamos el ascenso del arco, la transformación se invierte: disminuye la velocidad y al final nos paramos momentáneamente en el extremo del arco.

La altura que alcancemos depende de cómo hayamos actuado durante el balanceo. Si hemos seguido agachados, el movimiento ascendente será una imagen especular del descendente y nuestro centro de masa alcanzará la misma altura que tenía al iniciarse el movimiento hacia adelante, es decir, dos metros. Pero si nos enderezamos al pasar por el punto más bajo, llegaremos más alto.

Este incremento de altura se debe a dos motivos. El primero es que, tras habernos enderezado, nuestro centro de masa se encuentra más alto al comenzar el ascenso. Supongamos que al erguirnos nuestro centro de masa suba 0,5 metros. Aceptemos como hipótesis que el hecho de erguirnos no varíe nuestra energía cinética (hipótesis que examinaré más adelante). El valor de la energía cinética que nos anima al pasar por el punto más bajo determina la altura que alcanzará nuestro centro de masa con el impulso hacia adelante que llevamos. Puesto que hemos descendido dos metros, debemos poseer una energía cinética suficiente para que nuestro centro de masa suba dos metros. Pero, si nos levantamos, añadimos medio metro a la altura de nuestro centro de masa, que alcanzará una altura de 2,5 metros en el extremo del recorrido. Conforme nos aproximamos a ese punto, el asiento del columpio gira en torno a nuestro centro de masa, de modo que también el asiento se eleva más que antes.

Así, pues, la amplitud crece; continuando derechos sólo conseguiremos mantener el balanceo hacia adelante y atrás, para alcanzar en ambos extremos 2,5 metros. Si queremos que el columpio se eleve más, deberemos agacharnos al llegar al extremo del arco, de suerte tal que podamos levantarnos al pasar por el punto más bajo. Desde luego que al agacharnos hacemos descender un poco nuestro centro de masa y sacrificamos una fracción de la altura en el extremo del arco, pero lo que se pierde al agacharse es menos de lo que habremos ganado al ponernos de pie. La razón es que, cuando nos agachamos, el columpio está inclinado con respecto a la vertical, por lo que desplazamos, oblicuamente y no exactamente hacia abajo, el centro de masa. Conforme nos mecemos más y más alto, aumentando el ángulo, decrece la altura perdida cada vez que nos agachamos. Si lográramos balancearnos con una amplitud de 90 grados, con agacharnos no disminuiríamos la altura de nuestro centro de masa.

La otra causa de que aumente la amplitud cuando nos ponemos derechos en el punto más bajo es más sutil. Al erguirnos, acercamos nuestro centro de masa al eje en torno al cual estamos girando; ello aumenta nuestra energía cinética y no la deja invariable, tal cual fue antes nuestra hipótesis. Puede que ese aumento nos resulte extraño: normalmente, cuando elevamos un objeto (o incluso nosotros mismos al ponernos de pie) no aumentamos la energía cinética de ese objeto. Lo que suele ocurrir es que el trabajo que realizamos en la maniobra de elevación se suma a la energía potencial, ya que hemos aumentado la altura del objeto.

Pero en el caso de un columpio la situación es distinta, puesto que estamos describiendo un movimiento circular. Para entender la cuestión, consideremos un ejemplo diferente, más familiar. Cuando una patinadora hace el trompo con los brazos extendidos y luego los encoge, se pone a girar más rápido. Con este ejemplo clásico, de libro de texto, se pone de manifiesto un importantísimo, aunque no siempre intuible, principio de la física: la conservación del momento cinético. Esta magnitud es el producto de la velocidad de rotación por un coeficiente llamado momento de inercia, que es función de la cantidad de masa y de la distribución de ésta alrededor del eje de rotación. En el caso de la patinadora, el momen-

to de inercia es grande al principio, porque tiene los brazos extendidos, y disminuye cuando los acerca al eje de rotación.

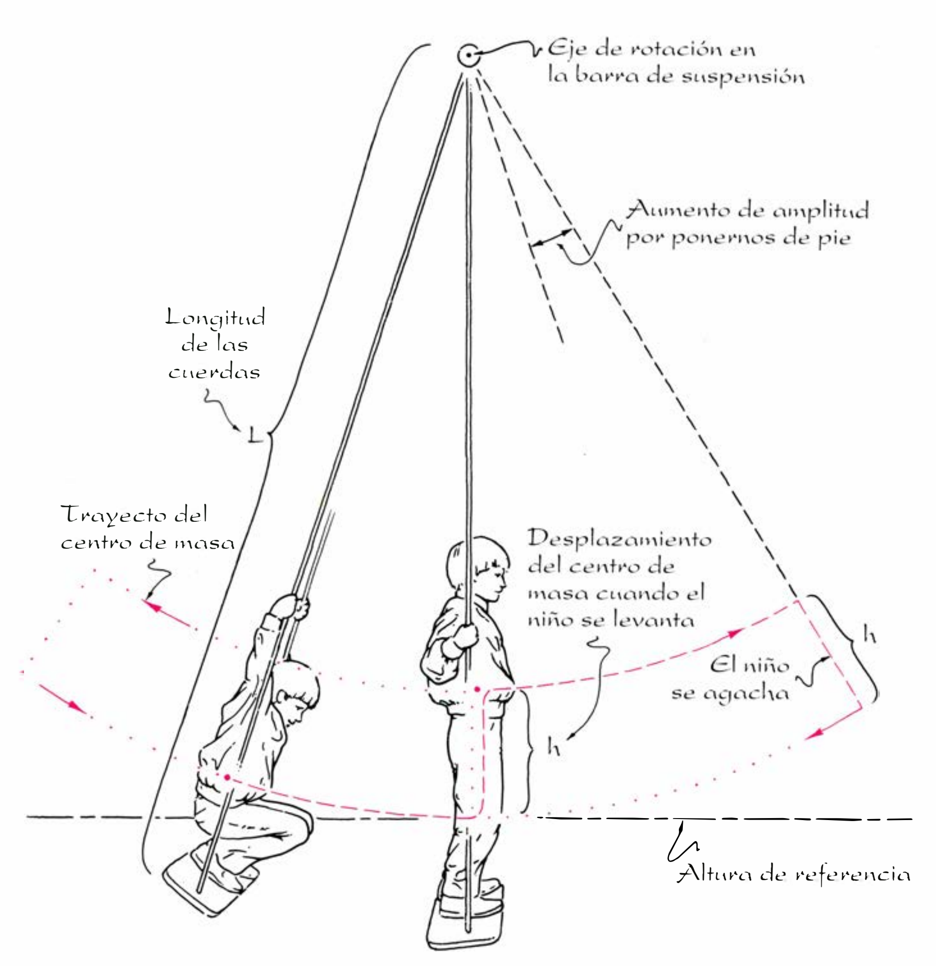
El momento cinético sólo puede cambiarlo una fuerza que actúe de una determinada manera. Si la fuerza no es radial (es decir, si prolongada idealmente no corta el eje de rotación), da lugar a un momento de giro que cambia el momento cinético. Pero si es radial, no crea momento de giro y deja igual el momento angular. Cuando la patinadora encoge los brazos, la fuerza es radial, así que su momento angular no varía con ese gesto. Esa disminución del momento de inercia debe ser compensada con un aumento en su velocidad de rotación.

La patinadora aumenta asimismo su energía cinética, que depende de su momento de inercia y del cuadrado de la velocidad de rotación. Aunque disminuya el momento de inercia, en la variación de la energía cinética tiene más peso el aumento de velocidad de rotación. El aumento de energía procede del trabajo que realiza la patinadora al contraer los brazos venciendo la fuerza centrífuga. (Esta fuerza es ficticia en el sentido siguiente: en la mayoría de los casos, la noción de que sobre un objeto en rotación actúe una fuerza hacia fuera responde más a razones prácticas y de construcción matemática que a la realidad. Lo que no impide inferir por vía matemática que la patinadora realiza un trabajo contra una fuerza centrífuga y que ese trabajo incrementa su energía cinética.)

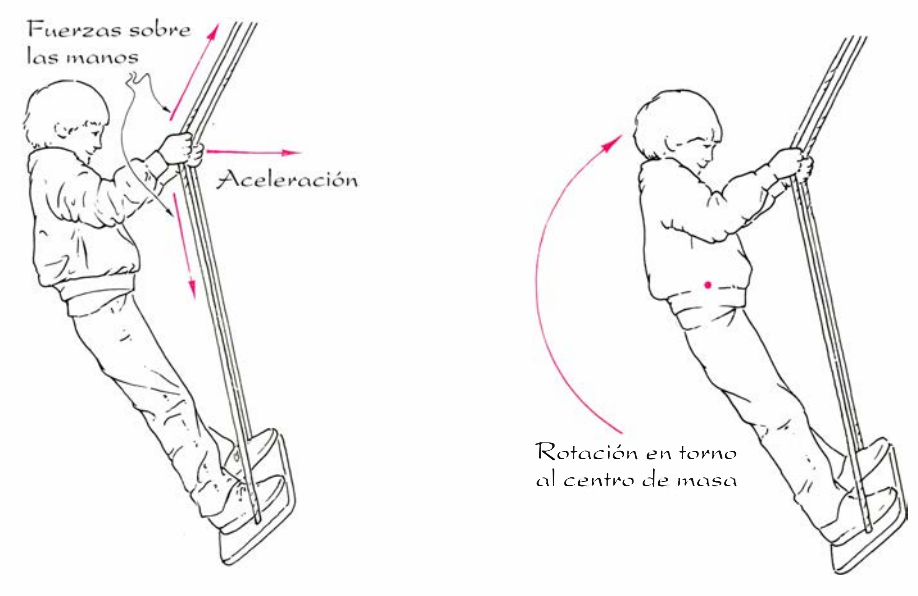
Los mismos conceptos son aplicables cuando nos ponemos de pie al pasar el columpio por su punto más bajo. Lo que hacemos entonces es disminuir nuestro momento de inercia, puesto que acercamos nuestro centro de masa al eje en torno al cual estamos rotando, es decir, a la barra del columpio. Esta fuerza se ejerce en dirección radial respecto a la rotación; no genera, pues, momento de giro. Como el momento angular no varía al ponernos derechos, la disminución de nuestro momento de inercia ha de compensarse con un aumento de nuestra velocidad en torno a la barra, con el resultado de que aumenta también nuestra energía cinética. El incremento de energía procede del trabajo que realizamos contra la fuerza centrífuga. Estas consideraciones no son válidas para el instante en que nos agachamos, al llegar al extremo del arco; en ese punto el columpio se ha detenido y sobre nosotros no actúa fuerza centrífuga alguna.

Para hacernos una idea de cómo cambia la altura alcanzada con el trabajo realizado contra la fuerza centrífuga, supongamos que las cuerdas tengan cinco metros de longitud. Nos agachamos a una altura de dos metros, nos balanceamos hacia abajo, nos erguimos y seguimos el balanceo hasta el extremo final del arco. Aquí, nuestro centro de masa alcanza una altura de 2,97 metros; los 0,47 metros adicionales proceden de nuestro trabajo contra la fuerza centrífuga. Cuando nos agachamos, nuestro centro de masa se encuentra a una altura de 2,52 metros, es decir, más alto.

No pretendo dar a entender que nuestro momento angular permanezca constante durante todo el balanceo, sino sólo que el hecho de enderezarnos no lo cambia. Lo que acontece es que, salvo cuando nos hallamos en el punto



1. Impulsando un columpio



2. Lo que ocurre al tirar fuerte de las cuerdas

más bajo del arco, si prolongamos con la mente la fuerza que la gravedad ejerce sobre nosotros (o sea, nuestro peso), ésta no pasa por el eje de rotación y el momento de giro a que da lugar altera continuamente nuestro momento angular. Así, mientras subimos, el momento de giro se opone a nuestra rotación y va rebajando nuestro momento cinético, hasta que éste se anula cuando llegamos al extremo del arco. Seguidamente, mientras descendemos, el momento de giro va restableciendo nuestro momento hasta que éste adquiere su valor máximo cuando llegamos al punto más bajo. Podemos explicar la ventaja que reporta el enderezarnos en el punto más bajo en términos de momento angular cinético. Por ser máximo en ese punto, la disminución que sufre nuestro momento de inercia al enderezarnos se traduce en un aumento de velocidad mayor que si nos pusiéramos derechos en cualquier otro.

Si el lector se ha columpiado recientemente, quizás haya advertido que, conforme nos balanceamos, le cuesta cada vez más ponerse erguido y que el aumento de amplitud se va haciendo mayor tras cada nuevo recorrido del arco. Al comienzo, erguirse cuesta poco esfuerzo porque la fuerza centrífuga que actúa sobre nosotros es pequeña; la velocidad en el punto más bajo es limitada. Por consiguiente, cuando elevamos nuestro centro de masa realizamos poco trabajo contra la fuerza centrífuga y nuestro aumento de energía cinética es sólo discreto. Además (y ello porque el ángulo de oscilación es pequeño), cuando nos agachamos, la disminución de altura de nuestro centro de masa es casi igual al aumento de altura del mismo cuando nos enderezamos. Por ser pequeño el trabajo y grande la pérdida de altura, en cada ciclo sólo se adquiere un leve incremento de amplitud.

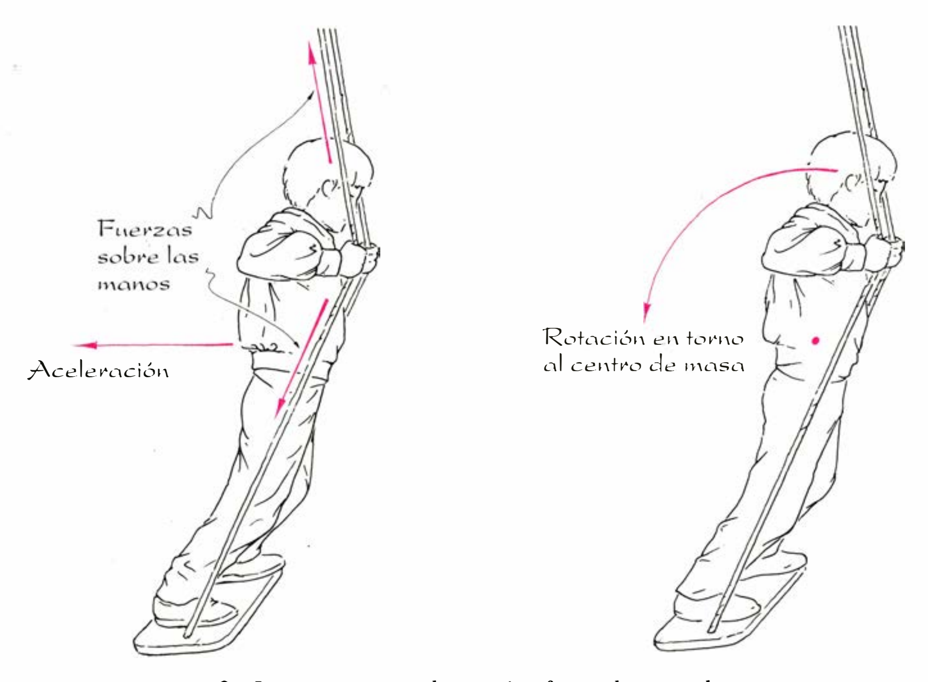
Poco después, cuando el columpio comienza a avivarse, la fuerza centrífuga aumenta porque nuestra velocidad en el punto más bajo es mayor. Podría ocurrir entonces que enderezarnos nos cueste cierto esfuerzo, pero con ello realizamos un trabajo mayor y nuestra energía cinética aumenta más. Y cuando nos agachamos, nuestro centro de masa desciende menos. De lo que resulta que sea mayor el incremento de amplitud en cada recorrido.

Cobrar impulso mediante la acción de erguirse y agacharse resulta sencillo. Pero, ¿cómo arrancamos sin que nada nos impela desde el suelo o sin que nadie nos ayude? Un procedimiento para conseguirlo lo examinó, en 1970, Bryan F. Gore, del Central Washington State College. Supongamos que nos encontramos de pie en un columpio inmóvil y suspendido de cuerdas livianas. De repente nos inclinamos hacia atrás y tiramos fuertemente de las cuerdas: las separamos de la vertical y las atraemos hacia nosotros [*véase la figura 2*]. Las fuerzas que sobre nuestras manos ejercen las cuerdas estarán parcialmente dirigidas hacia adelante, por lo que comenzaremos a acelerarnos hacia adelante. Las cuerdas están sujetas a una barra fija y a la plataforma que soporta nuestro peso; por eso, la fuerza que ejercemos sobre ellas se dirige hacia la barra y la plataforma.

Estas fuerzas producen, asimismo, un momento de giro que nos hace girar en torno a nuestro centro de masa, tendiendo a irse la mitad superior del cuerpo hacia adelante y la inferior (junto con la plataforma) hacia atrás. La rotación se superpone a nuestro movimiento general hacia adelante y al del columpio; si no existieran más restricciones, la mitad superior de nuestro cuerpo se desplazaría por delante de la plataforma. Al llegar al punto más alto de este primer arco de corta longitud, podríamos detener la rotación en torno a nuestro centro de masa si resistiéramos haciendo fuerza con los brazos para quedar alineados con las cuerdas. Pero también podemos empujar las cuerdas hacia adelante, de suerte que, al torcerlas, ejerzan sobre nosotros unas fuerzas parcialmente dirigidas hacia atrás [*véase la figura 3*]. El momento de giro debido a las cuerdas elimina nuestra rotación inicial y nos confiere una rotación en torno al centro de masa en sentido contrario.

Gore demostró que, una vez iniciado el movimiento del columpio, lo podemos ir impulsando si tiramos y empujamos sincronizadamente las cuerdas. Este procedimiento da resultado, estemos de pie o sentados. Al balancearnos hacia adelante, hay que tirar de las cuerdas hacia uno para que, al torcerlas, aparezcan sobre nosotros unas fuerzas dirigidas hacia adelante. Al final del arco debemos empujar las cuerdas y así detener la rotación en torno a nuestro centro de masa e impulsarnos hacia atrás. Mientras nos balanceamos hacia atrás, hay que seguir empujando las cuerdas. Al acercarnos al extremo trasero del arco, se vuelve a tirar de las cuerdas para detener la rotación en torno a nuestro centro de masa y provocar una fuerza dirigida hacia adelante. El trabajo que realicemos contra las cuerdas proporciona la energía necesaria para columpiarse.

En 1972, John T. McMullan, de la Universidad Nueva del Ulster, puso de manifiesto que un columpio podía ponerse en movimiento desde el reposo, aunque esté suspendido de varas rígidas, en vez de cuerdas flexibles del modelo de Gore. Se trata de ponerse de pie sobre el columpio, sujetar las varas con las manos y con los brazos flexionados, y dejarse caer hacia atrás hasta que los brazos queden extendidos y detengan nuestra caída. Durante la caída, hombre y columpio pueden asimilarse a un péndulo doble: la persona gira en torno a la plataforma a la vez que ésta



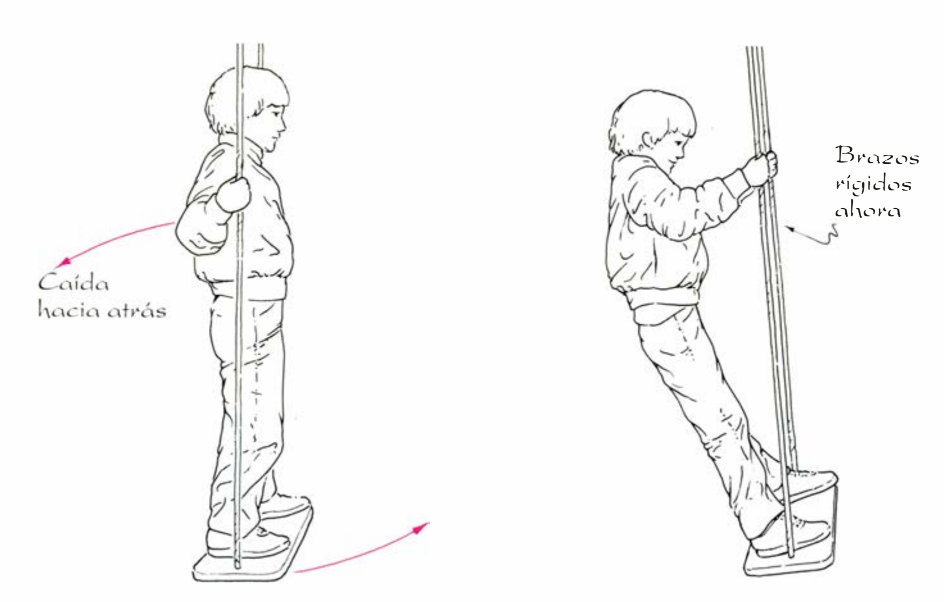
3. Lo que ocurre al empujar fuerte las cuerdas

comienza a girar en torno a la barra de suspensión. Una vez que los brazos, extendidos, detienen la caída, el hombre y el columpio actúan como un único péndulo. La energía del movimiento procede de la caída inicial de la persona, que transforma energía potencial en energía cinética. Iniciado el movimiento, podremos estimularlo irguiéndonos y agachándonos.

En 1976, Stephen M. Curry, de la Universidad de Texas en Dallas, volvió a examinar el tema del impulso por el procedimiento de erguirse y agacharse. Descubrió entonces que la velocidad de transferencia de energía al movimiento de balanceo presenta peculiaridades sorprendentes. Imaginemos que nos hallamos a punto de describir un arco tras habernos agachado, y que en ese preciso instante nuestra energía cinética sea E_0; simbolicemos en h la altura a la que elevamos nuestro centro de masa al enderezarnos y en L la longitud de las cuerdas. Cuando volvamos a agacharnos en el otro extremo del arco, nuestra energía cinética se cifrará aproximadamente en $E_0\ (1 + 3h/L)$. Tras un ciclo completo (ida y vuelta), nuestra energía cinética valdrá $E_0\ (1 + 3h/L)^2$ aproximadamente, y tras n ciclos nuestra energía cinética será $E_0\ (1 + 3h/L)^{2n}$ aproximadamente. Siempre que h sea mucho menor que L, la energía cinética se acomodará a la siguiente expresión: $E_0 \exp(6\ nh/L)$; indica ésta que la energía crece exponencialmente con el número de oscilaciones.

Si la amplitud del balanceo fuera pequeña, el tiempo T que se invierte en cada ciclo es una constante que depende sólo de la aceleración de la gravedad y de la longitud del péndulo que constituyen el hombre y el columpio. Supongamos que nos las hemos arreglado para iniciar el movimiento con una energía E_0 y que nos impulsamos durante un tiempo t. Para entonces habremos oscilado t/T veces y nuestra energía será $E_0 \exp[6(t/T)/(h/L)]$, lo cual demuestra que la energía también crece exponencialmente con el tiempo.

De todo su razonamiento Curry apuntó dos curiosas conclusiones. Primera, el ritmo al que se transmite energía al columpio no depende de nuestra masa, o del peso. Aunque las personas altas gocen de cierta ventaja con respecto a las bajas, pues h es mayor, tal ventaja nada tiene que ver con el peso. La segunda conclusión es más sorprendente. Los cálculos indican que, si la energía inicial es nula, nuestra energía tras ponernos derechos y agacharnos sucesivamente muchas veces debe seguir siendo nula; eso, desde luego, parece razonable. Pero, ¿puede alguna vez anularse realmente la energía inicial? La respuesta es no, puesto que el movimiento tiene lugar en un medio formado por moléculas de aire animadas de agitación térmica, que chocan contra nosotros sin cesar y aportan cierta energía inicial. Aprovechando esa energía podemos desarrollar las oscilaciones; mas, para ello, es necesario que nos vayamos poniendo de pie y agachándonos durante unos cuatro minutos antes de que se aprecie algún resultado.



4. Inicio del balanceo con soportes rígidos

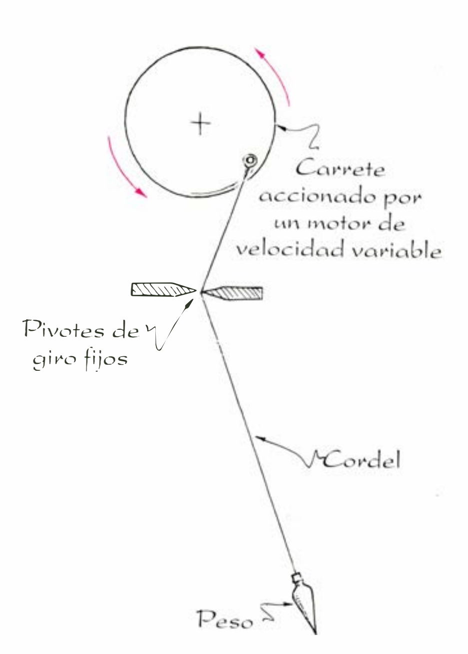
Curry llevó su razonamiento más allá. Supóngase que dispusiéramos de algún procedimiento para sobrevivir en un medio sometido a la temperatura del cero absoluto: las moléculas de aire no podrían ayudarnos a iniciar el movimiento. ¿Eliminaría ello la posibilidad de impulsar un columpio, sin más que erguirnos y agacharnos? Pues no; no la eliminaría porque uno de los principios de la mecánica cuántica no permite una energía nula. Incluso a la temperatura del cero absoluto, el conjuno de hombre y columpio deben seguir poseyendo cierta energía (bien que minúscula), a partir de la cual se amplifican las oscilaciones. En este caso tardaríamos unos seis minutos en observar resultados apreciables. La idea de columpiarse a la temperatura del cero absoluto quizá parezca algo extravagante, pero lo cierto es que la teoría lo admite.

En 1984, Juan R. Sanmartín, de la Universidad Politécnica de Madrid, reparó en que la mecánica que rige el movimiento de un columpio impulsado por la acción de erguirse y agacharse puede estar relacionada con el espectacular movimiento pendular del "botafumeiro", el famoso incensario que se viene empleando desde hace más de 700 años en algunas ceremonias de la catedral de Santiago de Compostela. El "botafumeiro", cuyo peso es similar al de un hombre delgado, cuelga de dos rodillos de madera, situados a unos veinte metros de altura, por una robusta soga. La soga pasa entre los rodillos y desciende hasta el suelo, donde la maneja un grupo de hombres.

Una vez que el incensario se pone en movimiento con un empujón, los hombres lo impulsan tirando de sus cabos en los momentos oportunos. Cuando el "botafumeiro" pasa por el punto más bajo, los hombres tiran fuerte de la cuerda hasta acortar en casi tres metros la longitud del péndulo. Luego, cuando llega al punto más alto del recorrido, los hombres largan la soga de modo que el péndulo recupere su longitud original.

El "botafumeiro" se impulsa mediante un mecanismo muy similar al de la persona que se columpia enderezándose y agachándose. Los hombres que accionan el "botafumeiro" transfieren energía al balanceo cuando acortan la longitud del péndulo, actuando contra la fuerza centrífuga. Tras 17 tirones, para los que se emplean unos ochenta segundos, el incensario se balancea barriendo casi noventa grados, elevándose hasta menos de un metro de la bóveda de la catedral. Su rápido paso por el tramo inferior del arco aviva la combustión de los tizones de carbón y del incienso que contiene. Es algo digno de verse.

Cuando un péndulo como el columpio es impulsado dos veces durante cada oscilación completa, se dice que la



5. Amplificador paramétrico de A. E. Siegman

estimulación es paramétrica. En 1969, A. E. Siegman, de la Universidad de Stanford, expuso con un sencillo montaje las propiedades de la estimulación paramétrica. Un peso que hace de péndulo se suspende de un cordel largo solidario a un punto contiguo a la periferia de un pequeño carrete que gira en un plano vertical accionado por un motor. Inmediatamente debajo de la rueda dos cantos sujetan el cordel, haciendo las veces de pivotes de giro.

La distancia del peso a los cantos determina la frecuencia natural a la cual oscilaría el péndulo si le comunicáramos al peso un pequeño impulso. Si el motor se ajusta de tal manera que la frecuencia a la que gire el carrete sea el doble de la natural del péndulo, éste se pondrá en movimiento sin necesidad de propinarle ningún impulso. Aunque al principio el peso se limita a mecerse levemente, su energía queda amplificada paramétricamente cada vez que la rueda tira hacia arriba del cordel; es decir, dos veces durante cada oscilación completa del péndulo.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

PUMPING OF A SWING. Peter L. Tea, Jr. y Harold Falk en *American Journal of Physics*, vol. 36, n.º 12, págs. 1165 y 1166; diciembre de 1968.

HOW CHILDREN SWING. Stephen M. Curry en *American Journal of Physics*, vol. 44, n.º 10, págs. 924-926; octubre de 1976.

O BOTAFUMEIRO: PARAMETRIC PUMPING IN THE MIDDLE AGES. Juan R. Sanmartín en *American Journal of Physics*, vol. 52, n.º 10, págs. 937-945; octubre de 1984.

Juegos de ordenador

Donde se habla de gusanos, virus y la Guerra Nuclear

A. K. Dewdney

"El único sistema verdaderamente seguro que conozco es el que se encuentra desconectado de la red, sumido en un bloque de hormigón, sellado en una habitación con paredes revestidas de plomo y vigilado por guardias armados –e incluso así tengo mis dudas."

EUGENE H. SPAFFORD

Los nudillos que llamaron a la puerta expresaban tan apremiante urgencia que el director del centro de cálculo alzó rápidamente la cabeza del rimero de papeles que tenía frente a sí. Emitió un sonoro gruñido y el operador de ordenador entró en su despacho.

"Algo va mal. Se han activado procesos muy extraños. Se nos está agotando la memoria. Creo que se nos ha colado un virus en el sistema."

Si el centro hubiera estado dotado de sirenas de alarma, no hay duda de que el director las hubiera hecho funcionar.

La escena anterior, con sus diversas variaciones, se ha representado demasiadas veces a lo largo de estos últimos años; en consecuencia, los virus informáticos se han convertido en noticia frecuente de los medios de comunicación. Esta sección de la revista ha salido a la palestra más de una vez en relación con los brotes infecciosos de virus informáticos, quién sabe si por haber sido instigadora de la Guerra Nuclear, juego cuyo objeto consiste en diseñar programas de ordenador deliberadamente concebidos para destruirse unos a otros. Mas, como pronto veremos, la Guerra Nuclear no tiene relación con las infecciones víricas.

Para comprender el funcionamiento de un virus informático es preciso conocer primero con gran detalle el sistema en el que opera. Otro tanto vale en lo atinente al funcionamiento de gusanos, bombas lógicas y demás amenazas contra la seguridad informática. Esta sencilla observación tiene dos implicaciones inmediatas. Primera, no será inverosímil que los periodistas den versiones erróneas o distorsionadas de las noticias sobre virus informáticos por razones del todo inocentes: para la mayor de ellos, el funcionamiento interno de los ordenadores encierra el más secreto de los arcanos. Segundo, las descripciones públicas de los virus de los ordenadores, ni siquiera las más detalladas, no permiten jamás la reconstrucción del virus, salvo a quienes, para empezar, tengan ya el detallado conocimiento del sistema que es imprescindible para infectarlo. Un "tecnópata" debidamente informado, con tendencia a la destrucción de los datos y programas de otras personas, no necesita leer artículos de revistas generales para imaginarse formas de construcción de virus. Por consiguiente, ningún daño se hace al describir el funcionamiento de los virus y de otros programas destructivos. (En realidad, es probable que tales descripciones sean beneficiosas, al estimular los esfuerzos tendentes a la protección de los equipos informáticos.)

Desde un principio, importa distinguir entre los dos tipos más comunes de programas malignos. Los virus han de ser llevados a cuestas por otros programas; no pueden existir por sí mismos. Los gusanos, sin embargo, pueden llevar una existencia independiente, más a la manera de las bacterias. Y ambos tipos de "infección", lo mismo que cualquier otro programa, dependen de un sistema operativo.

La mayoría de los lectores saben que un ordenador en servicio consta de equipos materiales (*hardware* en la jerga anglosajona) y programación o *software*, lo que podríamos comparar a cuerpo y alma. Frente a mí, en este momento, tengo un elemento de material: un ordenador Apple IIc. En la memoria de la máquina habita ahora mismo un conjunto de programas, llamados Appleworks Word Processor. El programa transfiere los caracteres que voy pulsando en el teclado a una sección de la memoria que el programa reserva para almacenar texto.

Pero el programa de proceso de texto no puede funcionar por sí solo. Exige un sistema operativo, el cual, entre otras cosas, lo traduce a un lenguaje de máquina especial que capacita al equipo para llevar a cabo las instrucciones del programa. Normalmente, el sistema operativo de un ordenador personal reside en un disco. Para poder hacer algo con tal máquina (sea la manipulación de textos o vídeojuegos), es preciso cargar primero el sistema operativo del disco (el ubicuo DOS) en la memoria electrónica de la máquina. En los ordenadores domésticos, el DOS se carga automáticamente desde un disco, que puede contener, o no, el programa que deseamos hacer funcionar cuando accionamos el interruptor de puesta en marcha.

Para ejecutar un programa en mi ordenador personal tengo que escribir en el teclado el nombre de ese programa particular. Entonces, el DOS del ordenador examina el disco para localizar un programa de ese nombre, lo carga en la memoria e inicia su ejecución, instrucción por instrucción, como vemos en la figura 1.

Al cargar el programa, el DOS reserva para él una sección de la memoria interna, no sólo para él, sino también para proporcionar al programa "espacio de trabajo". Es aquí donde el programa almacenará todos los valores asignados a sus variables y tablas, pongamos por caso. Al hacerlo, el DOS tiene cuidado en no "pisar" otros programas o zonas de datos, sin olvidar, por supuesto, aquella parte de sí mismo residente en la memoria. El DOS muestra idéntico esfuerzo al almacenar en disco programas o datos.

No pocas veces, al programador le resulta necesario utilizar las mismas órdenes que emplea el DOS; se hallan éstas explicadas en el manual correspondiente. Tales órdenes permiten escribir subprogramas capaces de leer ficheros registrados en disco magnético y transferirlos a la memoria, alterar los ficheros y volver luego a grabarlos en el disco..., a veces con malos propósitos.

He aquí una muestra de subprograma vírico que hace exactamente eso. Contiene una mezcla de subrutinas y pseudo-órdenes del DOS. Las subrutinas son pequeños programas internos (cuyas instrucciones componentes se guardan aparte del cuerpo principal de la subrutina) que se encargan de efectuar misiones específicas cuando son invocadas.

este := cazafichero
CARGAR (*este*)
pos := búsqueda (*este*)
insertar (*pos*)
ALMACENAR (*este*)

La subrutina llamada "cazafichero" abre el directorio de ficheros ejecutables (o sea, los programas) de un disco, toma al azar uno de los nombres de fichero y lo asigna a una variable llamada *este*. La línea siguiente de nuestro programa utiliza la orden (comando, en la jerga) CARGAR del hipotético sistema operativo para copiar el fichero en la memoria interna del ordenador. Seguidamente, otra subrutina llamada "búsqueda" inspecciona el programa recién cargado, tratando de hallar en él una instrucción que sirva adecuadamente de punto de inserción donde alojar un virus. Cuando encuentra dicha instrucción, determina el número de línea de la instrucción y le asigna su valor a la variable llamada *pos*.

En este punto, el subprograma vírico está listo para infectar al programa que ha elegido al azar. La subrutina "insertar" sustituye la instrucción elegida por otra (una instrucción, por ejemplo, de invocación de cierta subrutina) que transfiere la ejecución a un bloque de código que contiene al subprograma básico del virus, que se añade al final del programa a infectar. A continuación, agrega la instrucción original al extremo del programa añadido, seguida de una orden que transfiere nuevamente la ejecución al programa hospedador, a la instrucción que va tras el injerto.

De esta forma, cuando se ejecuta el subprograma del virus, se ejecuta también la instrucción eliminada de su programa hospedador. La ejecución del programa original prosigue entonces como si nada extraño hubiese ocurrido. Pero la verdad es que el subprograma del virus ha usurpado momentáneamente el control del sistema operativo (DOS) al objeto de replicarse a sí mismo en otro de los programas del disco. El proceso queda gráficamente ilustrado en la figura 1. Posteriormente, cuando el programa recién infectado sea cargado por el DOS en la memoria del ordenador y ejecutado, infectará a su vez a otro programa del disco, mientras en apariencia funciona normalmente.

Ya en 1984, Fred S. Cohen llevó a cabo experimentos de infección controlada en la Universidad de California del Sur, experimentos que revelaron, para sorpresa suya, que virus similares al recién descrito podían infectar en cosa de minutos toda una red de ordenadores. Para explicar el tipo de daños que tales virus pueden causar voy a adaptar el virus genérico de Cohen, redactándolo en un pseudo-lenguaje.

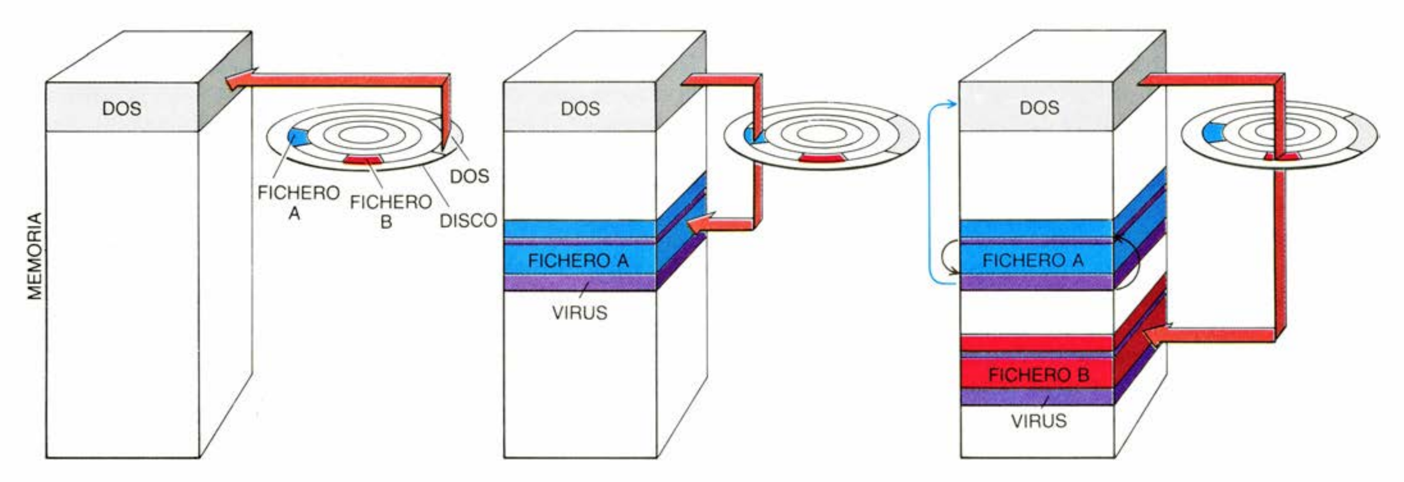
```
1234567
programa principal:
1. infectar
2. si se acciona el disparador, causar daño
3. ir al programa hospedador : infectar
subrutina: infectar
1. tomar al azar un fichero ejecutable
2. si la primera línea del fichero es 1234567, ir a 1; si no, pre-fijar virus al fichero.
subrutina: disparador accionado
subrutina: causar daño
```

El virus genérico de Cohen es genérico en todo, menos en el punto de fijación, pues en lugar de anclarse en mitad o al final de un programa lo hace al principio del mismo. La primera línea del programa vírico es el "código de reconocimiento" 1234567. El programa principal invoca en primer lugar la subrutina infectar, que empieza por recobrar del disco un fichero ejecutable y comprueba si la primera línea del mismo es 1234567. Si lo es, el programa ha sido infectado ya, y la subrutina elige otro programa. Si la subrutina acierta a encontrar otro fichero no infectado, le "prefija" el programa vírico completo al programa diana. Lo cual significa tan sólo que se coloca a sí mismo a la cabeza del programa y se encarga de ser ejecutado en primer lugar, antes de transferir nuevamente el control al programa infectado.

Las dos siguientes subrutinas reclaman una condición o situación que "accione el disparador" y realice algún daño. La situación desencadenante puede consistir en que el reloj del sistema alcance una determinada fecha o en la eliminación del nombre de cierto empleado del fichero de nóminas. El daño a realizar puede ir desde el borrado de todos los ficheros, o algo más sutil, hasta la alteración aleatoria de unos cuantos bits en unos cuantos lugares. Hay un sinfín de posibilidades.

Las situaciones que provocan el disparo y los daños consiguientes nos llevan a las lindes del campo moral. Me parece indudable que perpetrar deliberadamente daños a los ficheros de un ordenador, sea mediante un virus o por cualquier otro programa destructivo, es un acto reprensible. Los programas de ordenador y los datos no son meras ristras impersonales de ceros y unos, sino diminutas ciudades creadas por el pensamiento. ¿Por qué habría nadie de querer destruir el trabajo de otro?

Quienes preparan programas víricos lo hacen por multitud de razones. Por ejemplo, el programador de una gran empresa podría albergar un secreto rencor contra la dirección de la misma. Podría implantar un virus pensando en el día en que pierda su empleo. Cuando eso ocurra, sus datos serán borrados del fichero de nóminas, y tal acción, desencadenar el virus. En venganza, programas y datos de gran valor para la empresa podrían desaparecer o ser corrompidos, causando a la compañía errores graves y onerosos. La sustitución de los datos y programas por copias de seguridad almacenadas en otros



1. La carga de DOS en la memoria (izquierda) *permite la lectura de un programa* (centro) *y la autorreplicación de un virus* (derecha).

medios podría no servir de nada, porque si las copias de seguridad se hicieron recientemente, también éstas podrían hallarse infectadas.

Evidentemente, el tipo de destrucción recién descrita tendría lugar, de ordinario, en sistemas informáticos multiusuario. El sistema operativo de esta clase de entornos informáticos encierra mayor complejidad que el sistema operativo de los discos de un ordenador personal. Para empezar, el hecho de que sean tantos los usuarios de unos mismos recursos exige un sistema operativo que les proteja lo más posible de interferencias mutuas, deliberadas o involuntarias. No obstante, también en este caso son posibles los virus, pero exigen un refinamiento mucho mayor. Suelen sacar partido de algún fallo del sistema operativo –un "chinche", por así decirlo– como puso en evidencia el "virus" (que era, en realidad, un "gusano") que se difundió por la red informática Internet el pasado otoño.

Durante la noche del 2 de noviembre de 1988, alguien hizo funcionar un programa gusano en uno de los varios millares de ordenadores interconectados mediante una red de comunicación de datos norteamericana, llamada Internet. La Internet conecta máquinas de universidades, empresas, agencias gubernamentales, como la NASA e incluso algunas instalaciones militares. Con aterradora velocidad, el gusano se difundió a más de 1000 máquinas durante esa noche y el día siguiente. Conforme iban proliferando las copias del gusano, los operadores de los sistemas individuales podían observar cómo se disparaba la utilización de memoria y como la respuesta de la máquina se tornaba cada vez más perezosa. El gusano no atacó archivos ni programas, sin embargo. Pareció contentarse con proliferar en tantas máquinas como fuera posible. Incluso así, los daños por tiempo perdido fueron inmensos.

Como ya mencioné antes, un gusano es un programa capaz de vivir con autonomía dentro de un ordenador; se traslada por sí mismo de un ordenador a otro, y va dejando duplicados de sí mismo en cada máquina. El gusano de Internet constaba de dos partes, un cuerpo y un vector. A partir de un ordenador hospedador determinado, el gusano buscaba un nuevo hospedador, enviando su vector a otro ordenador. Una vez dentro de la máquina, el vector establecía un enlace de comunicación mediante el cual pudiera enviarse el cuerpo del gusano. Los detalles de este ataque fueron revelados en un documento de 40 páginas por Eugene H. Spafford, de la Universidad Purdue, a las pocas semanas del acontecimiento. Un ejemplo del funcionamiento del gusano muestra la sagacidad e inteligencia de su creador.

INSTRUCCION	EXPLICACION
DAT B	Enunciado no ejecutable; B es el valor del dato.
MOV A B	Traslada el contenido de la dirección A a la dirección B.
ADD A B	Suma el contenido de la dirección A a la dirección B.
SUB A B	Resta el contenido de la dirección A a la dirección B.
JMP B	Transfiere el control a la dirección B.
JMZ A B	Transfiere el control a la dirección A si el contenido de la dirección B es cero.
JMN A B	Transfiere el control a la dirección A si el contenido de la dirección B no es cero.
DJN A B	Restar 1 del contenido de la dirección B y transferir el control a la dirección A si el contenido de la dirección B no es cero.
CMP A B	Compara los contenidos de las direcciones A y B; si son iguales, salta a la siguiente instrucción.
SPL B	Divide la ejecución entre la instrucción siguiente y la instrucción de la dirección B.

2. Breviario de instrucciones de la Guerra Nuclear.

UNIX, el sistema operativo elegido por muchos de los ordenadores de la red Internet, permite que, en un ordenador, tengan lugar procesos no asociados a ningún usuario concreto. Tales procesos independientes son conocidos por "demonios". Uno de tales demonios, llamado *fingerd* (pronúnciese "fínguer-dí"), facilita que los usuarios recaben información relativa a otros usuarios. Tal servicio es deseable en ambientes informáticos en los que los usuarios han de compartir programas y datos destinados a investigación y desarrollo.

El gusano alojado en el hospedador concreto actual enviaría un mensaje a uno de los potenciales ordenadores hospedadores de su lista (que fue obtenida ilegalmente). Al solicitar los servicios del demonio *fingerd*, el gusano le proporcionó cierta información, como podría hacerlo un usuario corriente. Pero fue tantísima la información que el gusano le suministró al demonio, que los datos ocuparon totalmente el espacio reservado a ellos en la memoria del ordenador y se desbordaron a una zona "prohibida".

La zona de este modo sobrescrita estaba normalmente reservada para las instrucciones que *fingerd* consultaba para decidir qué hacer a continuación. Una vez en el interior de tal zona, el gusano (cuyo cuerpo habitaba todavía en la máquina hospedadora primitiva) invocó uno de los llamados intérpretes de mandatos de la nueva máquina, reclamando de este modo para su uso exclusivo una pequeña porción del sistema operativo UNIX. Una vez que tuvo a su disposición el intérprete de mandatos, el gusano transmitió unas 99 líneas de código fuente, que constituían el vector. Obedeciendo las órdenes del gusano, el desprevenido hospedador potencial procedió a compilar y ejecutar el programa del vector, quedando así la infección virtualmente garantizada.

El programa vector se ocultó después en el sistema, cambiando su nombre y borrando todos los ficheros temporales creados durante su infiltración. Efectuado esto, establecía un nuevo canal de comunicación con el hospedador precedente, y valiéndose de protocolos estándar del sistema, copiaba en el nuevo sistema los ficheros que componían el cuerpo principal del gusano.

Una vez en el interior del nuevo ordenador anfitrión, la tarea principal del gusano fue descubrir los nombres y direcciones de nuevas máquinas hospedadoras, irrumpiendo en zonas reservadas para usuarios legítimos del sistema. Para ello, se valió de un refinado plan de tanteo de posibles contraseñas, que, debido al poco cuidado con que

los usuarios las eligen, demostró tener bastante éxito. En cuanto atinaba la contraseña de un usuario legítimo, el gusano podía hacerse pasar por él, leer lo que éste pudiera tener en la memoria del ordenador y descubrir los nombres de otros ordenadores de la Internet a los que también poder infectar.

Según Spafford, casi todas las peculiaridades de UNIX que permitieron que el gusano funcionase han sido corregidas ya. Hecho que, sin embargo, no ha aliviado sus preocupaciones sobre seguridad informática, como revela la cita inicial del artículo. Tal vez estuviera pensando en las investigaciones teóricas de Cohen sobre los virus, que podrían aplicarse exactamente igual a los gusanos.

Si los tecnópatas se empeñan en cometer actos vandálicos en los sistemas informáticos, puede que sea llegado el momento de formar un centro para el control de virus. Durante la crisis del gusano de la Internet, los equipos de la Universidad de California en Berkeley y unas cuantas otras estaciones Internet lograron capturar copias del gusano, analizar su código y determinar su funcionamiento. Parecería razonable establecer una comisión nacional encargada de combatir los virus y gusanos informáticos en cuanto brotasen, especialmente si –como parece– las infecciones de ordenadores están condenadas a aumentar. Aunque la experiencia de la Internet nos dio una ligera idea de los horrores que podrían sobrevenirnos, también puso de manifiesto la eficacia de la resistencia organizada contra ellos.

Cohen ha establecido que es imposible escribir un programa de ordenador capaz de detectar todos los virus concebibles, pero sí puede construirse una defensa contra cualquier virus dado. Por otra parte, cualquiera que sea el sistema de defensa, siempre habrá virus capaces de eludirlas. Según Cohen, este aterrador estado de cosas podría someter a los entornos informáticos del futuro a una especie de evolución, en la cual solamente los programas más aptos sobrevivirían.

La situación nos recuerda la de la Guerra Nuclear, juego informático al que ya me he referido en secciones anteriores [*véase* INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, *julio de 1984, mayo de 1985 y marzo de 1987*]. Pero un programa de Guerra Nuclear no abusa de sistemas inocentes. Se enzarza con otro de su mismo tamaño, con otro programa de Guerra Nuclear. Los dos programas se traban en conflictos sutiles o abiertos en una zona especialmente reservada de la memoria de un ordenador, llamada coliseo. No hay peligro de que un programa de Guerra Nuclear llegue jamás a escapar para hacer daño en el mundo real, porque ningún programa de Guerra Nuclear ni nada semejante podría jamás funcionar eficazmente en un ambiente informático normal. Los programas de Guerra Nuclear se redactan en un lenguaje especial llamado Redcode, que se resume en la tabla de la figura 2.

Posiblemente un ejemplo sencillo de tal programa servirá para presentar el juego a los lectores todavía no familiarizados con él. He aquí un programa llamado ENANO que lanza un 0 como si fuera una bomba en la quinta posición de memoria de cada cinco.

```
DAT −1
ADD #5 −1
MOV #0 @ −2
JMP −2
```

El coliseo de la memoria, donde residen todos los programas de Guerra Nuclear, consta de varios miles de direcciones, o sea, células de memoria numeradas, dispuestas en una larga tira. Las instrucciones que componen el ENANO, por ejemplo, ocupan cuatro direcciones consecutivas en el coliseo; verbigracia, las 1001, 1002, 1003 y 1004.

La sentencia DAT sirve para albergar un valor que será utilizado por el programa (−1, en este caso) en la dirección 1001. La sentencia ADD se encarga de sumar el número 5 al número almacenado en la dirección anterior, esto es, en la 1001, convirtiendo el −1 en 4. El mandato MOV mueve el número 0 a la célula de memoria aludida por @−2. ¿Qué posición es ésa? La dirección se halla por referencia a la sentencia DAT, dos líneas más arriba del mandato MOV. Encontramos en ella la dirección en la que el programa pondrá el número 0. El mandato final, JMP, provoca que la ejecución del programa ENANO retroceda dos líneas, hasta el mandato ADD. El proceso vuelve a comenzar.

La segunda vez, ENANO cambiará a 9 el contenido de la célula DAT y después entregará un 0 en esa posición de memoria. Si se diera la circunstancia de que un programa enemigo tuviera una instrucción en esa dirección, tal instrucción quedaría inutilizada y es posible incluso que el programa muriera a resultas.

De esta manera ENANO sigue depositando bombas 0 en una de cada cinco posiciones, hasta que llega al final de la memoria..., aunque la memoria nunca acaba, porque la última de sus direcciones es contigua a la primera. Las bombas del ENANO comienzan a caer cada vez más cercanas a él mismo. Sin embargo, como ENANO tiene sólo una longitud de cuatro instrucciones y el número de células de la memoria suele ser múltiplo de 10, ENANO evita bombardearse a sí mismo y sobrevive para seguir luchando, aunque ciega y bastante estúpidamente.

A lo largo de estos últimos años la Guerra Nuclear ha evolucionado hasta convertirse en un juego bastante refinado, con numerosas estrategias y contraestrategias. Hay programas que engendran copias de sí mismos, que lanzan hordas de descerebrados programas de combate, peones monolínea e incluso programas que se reparan a sí mismos cuando son alcanzados.

La sociedad internacional de guerras nucleares organiza campeonatos anuales donde se someten a prueba las mañas e ingenios de los programadores. Los lectores interesados en participar en un encuentro de Guerra Nuclear deben ponerse en contacto con William R. Buckley, en 5712 Kern Drive, Huntington Beach, Calif. 92649.

En el campeonato de 1987, los programas presentados por los japoneses le dieron a los programas guerreros norteamericanos tela para cortar. El vencedor del último torneo, celebrado en Los Angeles el pasado mes de diciembre, fue un programa venido de la Unión Soviética, llamado, curiosamente, COWBOY. Escrito por Eugene P. Litko, de Pereslavl-Zalessky, una pequeña villa al noreste de Moscú, COWBOY parecía atento a las "pasadas de bombardeo" de los programas enemigos, para desplazarse y ponerse a salvo y luego tomar represalias en masa. Litko ganó el primer premio, de 250 dólares.

Para concluir este artículo volveré a citar a Spafford: "La redacción y puesta en servicio de un virus no es el acto de un profesional informático, sino de un vándalo." Aquellos a quienes se les pase por la cabeza actos semejantes, que tomen parte en la Guerra Nuclear.

Deseo dar las gracias a Cohen, Spafford y a John Carroll, experto en seguridad informática de la Universidad de Western Ontario, por su ayuda en la preparación de este artículo.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

COMPUTER VIRUSES. En *Computer and Security*, vol. 7, n.º 2, págs. 117-125, 139-184; abril 1988.

COMPUTER VIRUSES. Peter J. Denning en *American Scientist*, vol. 76, n.º 3, págs. 236-238; mayo-junio 1988.

Libros

Partículas, ecología del sexo, biología teórica y Lavoisier

Carlos Pajares, Rafael Alvarado, Agustín Albarracín y Luis Alonso

PARTÍCULAS ELEMENTALES, por Ramón Fernández Alvarez-Estrada y Marina Ramón Medrano. Eudema; Madrid, 1988.

Digamos de entrada que nos hallamos ante un libro interesante, que representa un esfuerzo encomiable de divulgación de los diversos aspectos de las partículas elementales y de sus interacciones fundamentales. El trabajo de síntesis es grande, si se tiene en cuenta las múltiples facetas abordadas en sólo 172 páginas. La sistematización realizada, manteniendo el carácter divulgativo, es, quizá, su mayor virtud. Cualquier científico o ingeniero extraño al campo de las partículas puede encontrar aquí una buena oportunidad para completar su cultura y saber en qué contexto deben ponerse los conceptos e ideas que aparecen en el mundo subatómico. Cualquier estudiante inquieto de los primeros cursos de ciencias e ingeniería aplacará su curiosidad con su lectura. Pero no se busquen introducciones que muevan a admirar la belleza o ponderar la importancia de un aspecto; por el contrario, se pretende dar una visión general del campo de una manera concisa y resumida, haciendo accesible el panorama general a lectores de dispar procedencia.

Las propiedades generales de las partículas elementales, así como la introducción de las más usuales, están descritas en el capítulo 1, introduciendo en el 2 las interacciones entre ellas. Los capítulos 3 y 4 se consagran a la producción y detección de las partículas elementales. En ellos, aparecen descritos los diversos tipos de aceleradores existentes, desde un simple ciclotrón hasta el gran anillo de colisiones de electrones y positrones de Ginebra que será inaugurado en julio de este año. Se explica, asimismo, el funcionamiento de diversas cámaras y detectores de partículas.

En el capítulo 5 se hace una breve y útil excursión al campo de la radioterapia con partículas elementales, con una sucinta comparación de las diversas radiaciones (rayos X, rayos γ, electrones, neutrones rápidos, protones y piones negativos, iones), en cuanto a la energía depositada en los tejidos y a su aplicación. En el capítulo 6 se examinan las leyes de conservación en los procesos entre partículas elementales introduciendo diversos números cuánticos de las mismas.

El capítulo 7 estudia los quarks y los leptones, introduciendo la clasificación de determinadas partículas (hadrones) según su contenido en quarks. Dado que no se han encontrado quarks libres y siempre aparecen como constituyentes de partículas, se pregunta por la razón de este hecho. La posible explicación se describe explorando el comportamiento de las fuerzas entre quarks, así como el comportamiento de esta fuerza con la distancia entre quarks. Los agentes portadores de la fuerza, los gluones, merecen la consideración de los autores.

Una vez que se ha descendido, en la pregunta fundamental (¿De qué están hechas las cosas?), hasta el nivel de elementariedad de los quarks, leptones y de los agentes de las diversas fuerzas existentes, el siguiente capítulo está dedicado a las teorías que describen las interacciones. Se exponen la electrodinámica cuántica, la teoría electrodébil y la cromodinámica cuántica, haciendo especial hincapié en las predicciones de las teorías que han recibido verificación experimental. En particular, la predicción espectacular de la existencia de las partículas elementales Z^0, W^+, W^- de masas más de 80 veces el átomo de hidrógeno. Se desarrollan conceptos teóricos de difícil divulgación, como renormalización e invariancia gauge, aunque otros, quizá de más fácil exposición, sólo se mencionan.

En el capítulo 9 se describen los intentos de unificación de las interacciones electromagnética, débil y fuerte. Con la introducción de las supersimetrías y la incorporación de la gravedad en el programa de unificación acaba este capítulo. No se silencian las dificultades que aparecen en el programa de unificación, ni las cuestiones pendientes. En el capítulo 10 se detalla la teoría de cuerdas en el marco de la unificación de todas las interacciones. Los dos últimos capítulos, a pesar de la sencillez del lenguaje utilizado, pueden resultar de más difícil lectura.

Diversos apéndices, tablas y cuadros completan el texto. A ello hay que añadir una bibliografía adecuada de obras complementarias. Ventajas que debemos unir a la relación de los principales progresos y la correcta cronología de los mismos. (C. P.)

THE ECOLOGY OF SEX, por Paul J. Greenwood y Jonathan Adams. Edward Arnold, Ed.; Londres, 1987.

Libro muy a la inglesa, en cuarto menor, de escasa extensión, pero rico en sus dos páginas de bibliografía, toda ella de los últimos veinte años o poco más, y denso texto que va, deportivamente, al grano de los temas, sin la mínima disquisición teórica. Lo de "deportivo", para un libro estrictamente científico, no está escrito a humo de pajas. Pedro Laín, al hablar de la tipología de los hombres de ciencia, ha mencionado al sabio de tesitura sacerdotal, que tenían las grandes figuras decimonónicas –un Darwin, un Koch, un Pasteur y otros más–; la de los científicos americanos y, por extensión, la de los anglosajones de menos de sesenta años, es de un puro estilo deportivo. Hacen ciencia como deporte y saben jugar en equipo, huella, sin duda, de su formación colegial.

Por sus frutos los conoceréis. Y este librito sobre *La ecología del sexo*, riguroso en su planteamiento, pese a algunas lagunas que luego diré, es uno de esos claros modelos del pragmatismo anglosajón al tratar temas biológicos, en donde acecha el antropocentrismo, y cuyos rectos senderos bordean peligrosos abismos interpretativos. Los autores que comento, como tantos otros de su entorno cultural, se despreocupan de las menudencias teóricas, y, sin dudarlo, van por derecho. En la introducción se nos advierte que se va a tratar de la "sexualidad", no de la "reproducción", pues, en efecto, sexo y reproducción no son sinónimos.

Para el biólogo la sexualidad es nada más –y nada menos– que uno de los muchos problemas a considerar al tratar de los seres vivos; en síntesis se ocupa de los fenómenos biológicos, relativos a la reproducción y al desarrollo individual, a la herencia y a la evolución de las estirpes, incluidas estructura y formación de las células germinales.

Los seis capítulos del libro, de extensión equilibrada y con unas mínimas ilustraciones de tipo esquemático, van dedicados a los siguientes aspectos: *1.* Sexo y sexos. *2.* Determinación del

sexo. *3.* Sexualidad del individuo y de la especie. *4.* Proporciones entre los sexos y su evolución. *5.* Las diferencias entre los sexos y la selección sexual. *6.* Apareamiento y cuidado de la prole. El último capítulo, pese al título general del libro, aunque trate de los biótopos en donde se desarrollan los individuos y en los que, en su momento, tendrán lugar los apareamientos, más que *ecológico* es, sobre todo, *etológico*. Su tema se centra en las modalidades de asociación familiar, tribal o gregaria, así como en las relaciones de parentales y prole; va dedicado, en especial, a aves y mamíferos.

El capítulo primero, brevísimo, se limita a resumir el significado del sexo, de la sexualidad y de su evolución, sin mencionar los muchos problemas que esos importantes procesos entrañan. Es más, se supone que el lector tiene suficientes conocimientos de citología y de biología general; los autores, sin mayor dilación, estampan, casi de entrada, frases con las que pretenden obviar detalles. Veamos esto: "La selección natural –dicen– marca el curso de la evolución. Actúa sobre las diferencias heredables que presentan los seres vivos. Los mejor dotados sobreviven y se reproducen, los que no estén adecuadamente adaptados perecen. En definitiva, evolucionan nuevas especies, otras se extinguirán".

Ese epítome de las ideas darwinianas sobre el proceso evolutivo de las especies por selección natural cabría, como lema, en cualquier tratadito biológico. Los autores debieron, quizá, matizar algo más las frases que siguen: "La reproducción sexual implica la fusión de gametos y la recombinación de material genético. La diversidad y complejidad de la vida le debe mucho a la evolución del sexo. Pero la reproducción no depende del sexo y una y otro no deben confundirse. Muchas plantas, tales como la fresa, y muchos animales, como los corales, *pueden autopropagarse sin ningún tipo de sexo*. Sin embargo, no es mera coincidencia que algunos grupos, como aves y mamíferos, presenten únicamente reproducción sexual. Sin la sexualidad los organismos complejos no podrían haber evolucionado mediante selección natural. Incluso el modo primitivo de reproducción debió ser asexual: ni sexo, ni sexos. ¿Por qué evolucionó el sexo?".

Hay que advertir que la reproducción sexual está siempre en relación con un proceso biológico esencial, la reorganización del material genético. Se deduce así un principio general, el de la *individualidad* de cada organismo, que es una entidad *única y nueva*. Cada ser vivo es, en efecto, *irrepetible*, aunque también quede asegurada la peculiaridad de la estirpe, puesto que cada viviente ha heredado características comunes de su propia genealogía. *Continuidad* y *diversidad*, ése es el meollo de herencia y posibilidad de evolución. En los casos más usuales la reorganización del material genético tiene lugar con la fusión de los gametos parentales, portadores de las características de cada uno de los dos progenitores. Ahora bien, al formarse los gametos –normalmente mediante meiosis, durante la gametogénesis en los seres diplontes– ya tiene lugar una remodelación génica, tanto en la formación del gameto masculino, como en la del femenino. Hago hincapié en este aserto, para que quede claro que en la *partenogénesis* (desarrollo de un óvulo no fecundado) al formarse el óvulo ya tiene lugar una "reorganización del material genético", de ahí que la partenogénesis sea también una *modalidad de reproducción sexual*. Por desgracia numerosos biólogos anglosajones, en contra del parecer de muchos de sus colegas "continentales", incluyen la partenogénesis entre los fenómenos de reproducción sexual. ¡Craso error!

En segundo lugar, aunque muchísimos organismos presenten una o varias modalidades de reproducción asexual, como la gemación, la bipartición, la escisión múltiple y otras, también, comúnmente, en alguna fase de su vida entran en períodos de reproducción sexual y forman gametos. Recordaré que entre diversos vegetales son comunes los mecanismos de multiplicación vegetativa o reproducción asexual, verbigracia, por escisión (esquejes, plantones) o por gemación (yemas, como lo son los bulbos de la cebolla o del tulipán, los turiones), etc. En los animales, salvo en insectos y vertebrados, son muchos los grupos capaces de multiplicación vegetativa (corales y madréporas, esponjas, ciertos gusanos, etc.). Pero incluso en ciertos insectos y en muchos vertebrados hay, a veces, multiplicación vegetativa de los embriones (poliembrionía). Ese es el caso, bien conocido, del tatuejo, o de los gemelos univitelinos humanos, o verdaderos gemelos, que se forman de un único óvulo fecundado.

Por otra parte, en casi todos los organismos, y no sólo en los *eucarióticos* (con núcleos celulares provistos de membrana, con procesos de *mitosis* normales y de *meiosis* = mitosis meióticas), sino en los *procarióticos* (bacterias y algas azules = cianobacterias), pueden darse ciertas modalidades de reproducción consideradas como sexuales –sexualidad en las bacterias– (por implicar reorganización del material hereditario), además de la multiplicación vegetativa.

De hecho en los eucarióticos, tanto vegetales como animales, los ciclos biológicos suelen comprender fases de reproducción sexual y otras de multiplicación vegetativa. Pero además existe en los vegetales, desde las algas a las fanerógamas, el ciclo alternante, con reproducción mediante gametos y otra fase de reproducción espórica. De este aspecto de la reproducción vegetal no tratan los autores. Ese es otro fallo, que provoca una disruptiva desconcertante e ilógica en el esquema del libro. En resumen: ¿podríamos decir que la reproducción por óvulos no fecundados, en plantas o animales, es equiparable a la multiplicación por yemas? ¿Olvidaremos que hay microsporas y macrosporas –esporas masculinas y femeninas– en la reproducción de ciertos helechos como las selaginelas? ¿Podremos llamarle asexual a la hembra que se reproduce por partenogénesis en los rotíferos, en los pulgones, en ciertas avispas (cfr. págs. 5 a 6 y los casos de *haplodiploidía*, tratados en las páginas 9-14)? Si estudiamos esto con espíritu crítico veremos un cierto grado de incoherencia entre la definición que se ofrece de lo que es reproducción sexual y lo que se explica luego al abordar los casos de partenogénesis. Aparte la omisión de los ciclos vegetales con fase espórica.

Hechas las anteriores salvedades, en el primer capítulo se pone de manifiesto que, de algún modo todavía no aclarado, el curso evolutivo de las especies ha conducido a la sexualidad, cuya categoría diferencia a los individuos de acuerdo con el tipo de gametos que producen. Y son los organismos eucarióticos, con divisiones celulares mitóticas y meióticas, los más típicos representantes de la evolución de la sexualidad. En ellos puede definirse el ciclo vital, como transcurso entre una *singamia*, o fusión de los gametos, y una *meiosis*, o reducción cromosómica.

El ciclo *diplo-haplonte* de los vegetales es difícil de resumir, habida cuenta de sus numerosas variantes en algas, musgos y, sobre todo, en las fanerógamas. Pero es lástima que los autores no se hayan decidido, aunque fuera a costa de añadir unas pocas páginas más al libro, a tratar de estos aspectos, sobre todo dado que desde hace casi siglo y medio, con el alemán Hofmeister, se sabe que la evolución vegetal, con tendencia al predominio de los esporofitos, ha estado encauzada ecológica-

mente hacia la conquista del medio aéreo. Este medio más hostil (más o menos seco) ha podido ser colonizado gracias a la capacidad de resistencia de las esporas. En otros seres vivos (ciertas algas, los plasmodios productores del paludismo y pocos más), sólo el huevo o zigoto, con la fusión de los gametos, constituye la fase diploide. En él, de inmediato, se produce la meiosis (meiosis inicial) y todas las células de la fase vegetativa del ciclo son haploides. Son los llamados *haplontes*.

Pasemos ahora a la cuestión, crucial desde el punto de vista de la biología teórica, de la sexualidad (tema central del libro) y de la fecundación. El pragmatismo de los autores les hace ignorar la vertiente teórica de esos problemas, que desde antiguo han preocupado a los biólogos. Ya hacia 1870 se mencionaban nada menos que 400 hipótesis, para explicar la fecundación como consecuencia de la sexualidad, en relación con lo que se llamó *inmortalidad potencial del protoplasma*.

De esas hipótesis, a través de investigaciones de Bütschli, primero, y, desde comienzos de este siglo, de Calkins y más recientemente de Sonneborn, en los paramecios y otros ciliados, sólo quedan en pie la *teoría de la anfimixis* (fusión de los núcleos gaméticos en la fecundación), la *teoría del rejuvenecimiento* (fundada primeramente por Maupas [1888] y Calkins [1902-1904], al estudiar la conjugación en los protozoos ciliados) y la *teoría de la sexualidad* (de Hartmann [1915-1924] y sus secuaces). Todo este aparato teórico no cabría, evidentemente, en un librito de las dimensiones del que nos ocupa. En este sentido la omisión es deliberada, sin duda.

Por lo demás, las conclusiones que se exponen acerca de la evolución del sexo, de la fecundación y de la evolución resultante, para el caso de los organismos eucarióticos, están bien llevadas y son correctas. El sexo ha favorecido la variabilidad, dado que en cada generación los individuos que se originen resultan de una recombinación de los caracteres genéticos presentes en los progenitores. De ese modo, un simple cálculo estadístico sirve para comprender cuán enorme es el número de posibilidades combinatorias. Si admitimos, para cada especie, sólo 10 cromosomas, con un promedio de 1000 pares de genes (y desde luego ese cómputo está muy por debajo de la realidad) surge el inconcebible número de 10 elevado a 1000 (un uno, seguido de mil ceros), supuesto por autores como el genetista Dobzhansky. La cantidad es más que suficiente para que cada uno de los seres vivos, entre los muchísimos millones producidos en el curso de la evolución, haya tenido alguna peculiaridad exclusiva, e irrepetible, como lo son, por ejemplo, las huellas dactilares de cada persona. Es evidente, como conclusión a resaltar, que el sexo tiene un coste (biológico), a saber: costas de "fabricación" de los gametos, con un dispendio metabólico considerable, ya que se suelen producir en cada ser vivo muchos más de los que tendrán utilización efectiva.

A ese desperdicio de gran número de gametos, que no llegarán a formar nuevos individuos, se añade el de la energía gastada por los reproductores para encontrarse en los momentos adecuados. Todos estos factores guardan relación con mecanismos ecológicos y evolutivos, y han influido sobre la diversidad de las faunas y floras que pueblan la Tierra.

La determinación del sexo, que puede ser de tipo genético, en particular por caracteres que llevan los *cromosomas sexuales*, o bien está bajo el influjo de factores ambientales diversos, es abordada, mediante los oportunos ejemplos, en el capítulo segundo. A éste siguen los que tratan de las diversas manifestaciones de la sexualidad en plantas y animales: sexos separados o *diecia* (gonocorismo), sexos reunidos o *monoecia* (hermafroditismo) (capítulo 3); de las proporciones entre los sexos, en relación con los factores ecológicos que afectan a su regulación (capítulo 4). Se abordan aquí, también, los fenómenos de la *selección sexual*, que propusiera Darwin. Se estudian también varios aspectos del *dimorfismo sexual* en los animales (capítulo 5), con bastante detalle.

El capítulo sexto, que cierra la obra, está dedicado sólo a mecanismos de la cópula y cuidado de los jóvenes en aves y mamíferos. Esa limitación, también achacable al tamaño del libro y a la idea que se han propuesto los autores, tengo que lamentarla, por cuanto el estudio comparativo de otros tipos de ritos nupciales en grupos de vertebrados inferiores –sobre todo en peces y anfibios–, así como muchos de los aspectos ecológicos del apareamiento, incubación de huevos y atención a la prole en insectos, y en bastantes grupos de invertebrados inferiores, hubieran redondeado la visión panorámica de la evolución de la sexualidad en los animales. De ellos apenas se dice nada (caso del caballito de mar, del espinosillo, y muy poco sobre los artrópodos).

Libro lúcido, fácil de leer y recomendable al curioso de la naturaleza, pero también al estudiante de biología o al profesor, como resumen de ideas aprovechables. Pese al aparente desenfado en algunas frases –que entra en el estilo actual de muchos científicos–, es libro riguroso en su planteamiento científico. (R. A.)

HISTORIA DE LAS IDEAS BIOLÓGICAS, por E. Rádl. Alianza Editorial; Madrid, 1988.

La *Historia de las ideas biológicas* de Rádl constituye un clásico de la historiografía de las ciencias naturales. Todavía recuerdo la desazón –no es posible eludir el término– con que en mi ya lejana época de opositor, acudía a sus páginas, siempre con la sensación –sobre todo en su segundo volumen, "Desde Lamarck y Cuvier"– de no encontrar en su lectura los datos objetivos precisos para la preparación de los correspondientes temas. De ahí que el libro quedase luego abandonado en mi biblioteca, ocupando un venerable lugar en el panteón de los clásicos, apenas abierto de tarde en tarde para una puntual consulta. Por eso, la aparición de esta nueva edición, que nos ofrece tan pulcramente Alianza Universidad, ha supuesto para mí, al cabo de los años, el encuentro con un viejo e incomprendido amigo y el acicate para un nuevo intento de comprensión, desde mi presente y, quede ello declarado desde el principio, apoyado en la brillante y esclarecedora Introducción a la obra, de José M.ª López Piñero, titulada "Emanuel Rádl y su *Historia de las teorías biológicas*".

A mi juicio, la obra de Rádl supone el intento de una sucesiva serie de rupturas. Muy en primer término, la ruptura precisa con los historiadores de la biología que se acercaban a ella antes del siglo XIX interpretándola como la sucesión de sistemas diferentes, cada uno de los cuales contendría su propia justificación. Se trataría –muy en disonancia con la idea directriz de la historia científica moderna– de una especie de disección de distintos órganos, que no dejan ver la unidad del cuerpo a que pertenecen.

Frente a esta interpretación de la historiografía, Rádl es consciente que el XIX ofrece al historiador una nueva serie de posibilidades; muy en primer término, la arrolladora impronta del positivismo comtiano. Dejemos hablar al propio autor: "El naturalista actual ve en su ciencia, en las teorías admitidas precisamente ahora, la norma absoluta para la biología de todos los tiempos. Obliga a los múltiples acontecimientos de la historia de la ciencia a acomodarse por fuerza al esquema de los conocimientos desde el comienzo del pen-

samiento científico. Por un extremo enlaza con el pasado oscuro, por el otro profetiza el alba del porvenir". En su mente, al escribir tales palabras, está presente sin duda la *Historia de las ciencias inductivas* de Whewell, máximo representante de esta interpretación histórica, que afirma que el progreso general de la humanidad y el de la ciencia es esquematizar la viveza y frescura de la realidad, al presentar la sucesión de los acontecimientos científicos desde el punto de vista de una evolución lineal... con arreglo a leyes lógicas. Rádl, pronto lo veremos, va a intentar, frente a esto, "un ensayo imperfecto de seguir otra filosofía de la historia".

Otros científicos han tratado de presentar la historia como una función pedagógica, ya que su exposición permite sugerir nuevas ideas y aumentar los conocimientos, inculcando el verdadero espíritu científico. También duda nuestro autor de la efectividad de tal propósito.

Por fin, otros historiadores se acercan a la realidad del saber científico mostrándolo como una exposición de los antecedentes, de los "servicios" que cada investigador ha prestado a la ciencia. De este modo, el científico se instala, como juez, interpretando la obra de los predecesores por la obra propia. Se trataría del método genético, que intenta formar un juicio independiente sobre un problema, mostrando la rectitud o falsedad de ciertas ideas. "El verdadero historiador –subraya Rádl– no tiene relación con la corrección de las ideas; debe considerarlas como acontecimientos, como realidades plásticas."

Hora es, por tanto, de acercarnos al verdadero sentido de la *Historia de las ideas biológicas*. Oigamos de nuevo al propio autor. "La historia de la ciencia representa una historia de los destinos humanos: ...los descubrimientos, los errores científicos, no salen unos de otros... sino que están ligados a *sujetos concretos*." Muy en la línea de Nietzsche, Rádl trata de subordinar el conocimiento a la necesidad vital, incluso biológica. De ahí que, "así como la vida de cada individuo humano, de cada época histórica, representa una manifestación *sui generis* y se diferencia *cualitativamente* de todas las demás manifestaciones análogas, sólo pudiendo ser conocida por experiencia directa y no pudiendo ser deducida nunca de ciertas leyes generales, de igual modo todo acontecimiento científico posee un valor absoluto".

Por eso, frente a los historiadores positivistas, que buscan la verdad objetiva al término de la evolución de las ciencias, mientras que la vida científica del pasado y del presente consistiría tan sólo en una especie de preparación para el descubrimiento definitivo, Rádl denuncia que nadie puede ser fiel a esta hipótesis, porque todos están convencidos en su interior de que sus teorías encierran la verdad definitiva, la verdad en sí. Y así entona un canto a la realidad de cada hombre: "¿Es que hay fuera de los hombres con sus aspiraciones y actividades algo que pueda llamarse verdad, ciencia, conocimiento, naturaleza, ley?". "La ciencia sólo vive en los hombres y por los hombres..., tiene por límites las cualidades personales de los hombres, representa incluso una cualidad del hombre, como su rostro o su esqueleto. La misión del historiador es observar estas formas de la ciencia, estas múltiples manifestaciones del impulso científico, el modo en que cada acontecimiento científico se destaca del oscuro caos de lo infinito."

Recapitulemos. La obra de Rádl rechaza todas las anteriores concepciones de la historia y se apoya –él mismo lo confiesa paladinamente–, en la concepción *realista* del universo que ha encontrado su expresión más profunda en las novelas de Dostoiewsky y por la que ha luchado siempre su maestro, el checo T. G. Masaryk. Se trata de un realismo emparentado con la filosofía de Nietzsche –ya quedó subrayado– y que tiene como primer objetivo la descripción de los *acontecimientos*. La tarea de los historiadores, por tanto, consiste en descubrir las concepciones vivientes que guían a los investigadores y que les obligan a atacar problemas definidos, a examinar los hechos desde ciertos puntos de vista fijos, a creer en ciertas teorías... Porque, de nuevo Nietzsche, "todo gran hombre tiene una influencia retrospectiva... El pasado es harto desconocido y requiere muchas de esas influencias retrospectivas".

Pero ello da lugar a veces a situaciones azarosas. El historiador no debe cerrar los ojos ante estos hechos; debe buscar la verdad, no sólo cuando tuvo reconocimiento público, sino en todas partes donde la humanidad piensa. La labor del historiador consiste en reconocer ideas... incluso cuando en la lucha de las ideas desaparecen sin dejar huella aparente. Pero no por ello cesa esa teoría de ser un objeto para el historiador, pues es una verdad y, por consiguiente, pertenece al mundo de las verdades, en el cual el historiador vive y se mueve. El historiador debe reconocer él mismo la verdad y no esperar a que le fuerce a ello la presión de la opinión pública. De ahí el sentido

de los profundos versos con que concluye Rádl el capítulo que en el volumen segundo de su obra dedica a "La historia de las ciencias": "Nada –gritan insolentes– / se realiza y nada se lleva a cabo. / Mientras tanto algo grande está madurando / en silencio. / Y aparece. Pero nadie lo ve, / nadie lo oye en la algarabía. / Y con mucha tristeza pasa / silenciosamente."

Hasta aquí, al hilo de los propios textos de Emanuel Rádl, el sentido de su *Historia de las ideas biológicas*, aparecida en 1931 en dos volúmenes publicados por Revista de Occidente: "Hasta el siglo XIX" y "Desde Lamarck y Cuvier", ahora reeditados por Alianza Editorial. Intento de resurrección –con expresión de Ortega– de las ideas y de las verdades de los científicos del pasado, lejos del positivismo, de la pedagogía o de la génesis con que la historia había sido concebida en su época.

¿Qué dice hoy al lector curioso este libro? Sólo puedo hablar por mí mismo, el hombre que más próximo tengo. Como historiador, me supone una joya de la historiografía de los primeros decenios de nuestro siglo, enriquecida –es de justicia repetirlo– por las páginas de López Piñero, tan iluminadoras. Pero, como hombre de ciencia que trata de entender el pasado, no puedo sustraerme de aquella desazón de los años mozos, cuando el interés por la obra se perdía en un *maremagnum* de ideas, acaso reflejo, por mi propia incapacidad, de aquella algarabía que impide escuchar la maduración de algo grande. (A. A.)

LAVOISIER AND THE CHEMISTRY OF LIFE. AN EXPLORATION OF SCIENTIFIC CREATIVITY, por Frederic Lawrence Holmes. The University of Wisconsin Press, 1987.

Doscientos años se cumplen de la publicación del *Traité elementaire de chimie*, la obra máxima de la revolución científica que sella la defunción de la teoría del flogisto. Paradójicamente, no existe un estudio detenido del *Tratado*, a pesar del ingente número de artículos y libros sobre su autor, Antoine-Laurent Lavoisier (1743-1794), guillotinado por lo que algunos llaman, sin rubor, progresismo. Lo que pretendía ser un desarrollo de la "memoria que leí en sesión pública de la Académie des Sciences del mes de abril de 1787, sobre la necesidad de reformar y perfeccionar la nomenclatura de la química" (parte I, p. V) se transformó en dos volúmenes de 322 y 329 (653) páginas, respectivamente, con cuadros y láminas de extraordinario valor. Por cierto, la razón de esa metamorfosis haría las delicias de nuestros filósofos analíticos, aunque él se apoye en Condillac: "establece [éste en su *lógica*] que pensamos sólo con el recurso a las palabras; que las lenguas son verdaderos métodos analíticos; que el álgebra más sencilla, más exacta y mejor adaptada a su objeto, de todas las formas de enunciarse, es a la vez una lengua y un método analítico, en fin, que el arte de razonar se reduce a una lengua bien construida. Y, en efecto, mientras creía yo que me ocupaba sólo de nomenclatura, mientras que mi objeto se ceñía a perfeccionar el lenguaje de la química, mi obra se iba transformando, insensiblemente entre mis manos, sin que fuera posible defenderme de ello, en un tratado elemental de química" (I, páginas V y VI). Está visto que *nihil novum sub sole*.

De sus múltiples estudiosos, dos han marcado la pauta a seguir: Henry Guerlac y el autor que motiva esta reseña; este último en particular con el libro *Lavoisier and the Chemistry of Life*, de cuya segunda edición nos ocupamos aquí. Lo que no obsta para pensar que el mejor resumen del nudo de la cuestión sea, a mi parecer, la nota crítica que dio el *Journal de médecine, chirurgie, pharmacie, etc. dédié a Monsieur Frère du Roi* (enero de 1789, páginas 93 y 94) de la obra de Kirwan *Essai sur le phlogistique et sur la constitution des acides*, traducido del inglés por la mujer de Lavoisier, con refutaciones, capítulo por capítulo, de Morveau, Laplace, Monge, Berthollet y Fourcroy. Extractaré lo más pertinente: "Esta obra es una de las más idóneas para poner al día la diferencia entre la nueva química, que rechaza la existencia del flogisto, y las opiniones de los que admiten todavía este principio. M. *Kirwan* reconoce en la nueva doctrina grandes hipótesis en su favor, pero defiende que la antigua responde mejor a los fenómenos. Pretende que la cuestión se reduce a saber si el principio inflamable se encuentra en los ácidos flogistizados, los ácidos vegetales, el aire fijo, el azufre, el fósforo, el carbón y los metales. M. *Lavoisier* le responde que todas estas substancias poseen la propiedad de inflamarse y quemar cuando se les calienta en presencia de aire, es decir, la propiedad de descomponer el aire, el oxígeno, apoderarse de sus bases, y separar el calórico; mas no es necesario, para explicar este efecto, suponer con M. *Kirwan* que exista en esas substancias un principio común a todas, que contienen todas las bases del aire inflamable, es decir, el hidrógeno. Asegura que tal suposición no está en absoluto comprobada, y que aun cuando llegara a establecerse, no resultaría menos cierto que el auténtico combustible es el aire, que él es el que aporta el calórico y la luz durante el acto de combustión, y que ya no será necesario que la doctrina antiflogisto venga en auxilio de la vieja doctrina, para explicar los fenómenos de la calcinación y la combustión."

Holmes, en su estudio, desarrolla el alcance bioquímico, pretendido desde el principio, de la investigación de Lavoisier. Fisiología animal y vegetal y método científico riguroso son los ejes, no siempre bien conocidos, sobre los que gira la nueva química que alumbró. A ponerlos de manifiesto se dedica esta obra, dividida en cuatro partes: el gran sistema –teoría de la respiración y la combustión–; el reino vegetal –substancias vegetales inflamables, lenguaje químico, el problema de los azúcares, bioquímica–, y economía animal, compendiada en la reasunción de la teoría de la respiración. Cada capítulo presenta su propia escenografía, con el inamovible telón de fondo del laboratorio y, en particular, de sus balanzas de precisión. Vamos abriendo sus libros de notas, comprobando sus mediciones, sus titubeos, sus preguntas sobre todo acerca de tal proceso o cual resultado y, lo más importante, el sentido químico de lo que está sucediendo en el alambique. Se obvia el viejo camino de los logros desde la situación actual y se consigue que el lector se arrime curioso, quizás embelesado, al banco, donde está el maestro.

La nueva química se implantó pronto en España (1770-1790), gracias a un doble proceso de contratación de expertos extranjeros (Joseph-Louis Proust) y el envío de jóvenes españoles al exterior (los hermanos Elhuyar, Juan Manuel de Aréjula y Domingo García Fernández). Se crearon, además, los centros académicos necesarios para la institucionalización de su enseñanza: cátedra de química del Seminario patriótico de Vergara, cátedra de química del Colegio-Academia de Artillería de Segovia, las tres cátedras de química de Madrid (aplicada a las artes, la del Colegio de física, química y mineralogía y la del laboratorio de dicho nombre) y la del Real Colegio de Cirugía de Cádiz. Menos afortunada fue su introducción en la universidad. En líneas generales, sin embargo, la sombra de Lavoisier resultó beneficiosa para España, que pudo presentar dos figuras egregias en el desarrollo de la nueva química: Aréjula, en lo relativo a la química general, y Antonio de Martí y Franqués, por lo que se refiere a la química vegetal. (L. A.)

Apuntes

Aunque pocos, quedan todavía algunos paraísos por descubrir para el naturalista, para el liquenólogo en particular. Uno de esos refugios privilegiados de los líquenes son los Pirineos atlánticos. Se registra en ellos una abundante pluviosidad y frecuente nubosidad que propician el desarrollo de los líquenes epífitos y saxátiles. Colabora también la geología: del litoral a las cumbres, se suceden pisos de substratos diversos, formados por rocas calcáreas, silíceas o metamórficas. Por último, alejados de los centros científicos, los Pirineos occidentales apenas si se han visto visitados por los botánicos. Un primer trabajo de investigación ha cifrado en 804 especies, por lo menos, la flora liquénica existente.

Una vez más, la humilde enterobacteria *Escherichia coli* servirá de banco de pruebas para una cuestión genética fundamental: la cartografía entera de un organismo. Takashi Yura, de la Universidad de Kyoto, y Katsumi Isono, de la de Kobe, son los encargados del proyecto auspiciado por el Ministerio de Educación, Cultura y Ciencia de Japón para secuenciar los 4700 pares de kilobases, la fracción milésima del genoma humano, que componen el código del microorganismo.

Cuando otras ceden a la endogamia, el amiguismo o el mero capricho político del poder, la Universidad de California ha optado por la mano dura: expulsión de la misma de aquellos profesores que, en la docencia o en la investigación, se muestren incompetentes. La intromisión del poder en la autonomía de los centros amenaza, nada menos, la pervivencia de la Academia de Ciencias de Berlín, considerada por el partido ganador en las últimas elecciones municipales ''un club retrógrado''.

Los físicos teóricos andan a la busca de una prueba que les corrobore la existencia de la supuesta quinta fuerza. No parece convencer la demostración geofísica de la violación de la ley del inverso del cuadro de la gravitación, forma a través de la cual se manifestaría dicha fuerza fundamental, pues los experimentos aducidos hasta la fecha reciben suficiente explicación en el marco de la hipótesis newtoniana de la caída libre de los cuerpos. El otro camino que los físicos toman en su búsqueda de la prueba concluyente es el de someter a comprobación el principio de equivalencia débil, comparando las fuerzas ejercidas en dos substancias por un mismo atractor. A pesar de los fracasos en ambas direcciones, los físicos no han arrojado la toalla.

Las fotos tomadas por el Voyager 2 a su paso por Neptuno resultan especialmente prometedoras. Así, han permitido confirmar su período de rotación cifrado en 17-18 horas con la mera comparación de dos fotografías sacadas con dos horas de diferencia: la primera recogía una mancha blanca en el centro del planeta, mancha que, en la segunda, se hallaba ya en la periferia del mismo. El color natural de Neptuno, como el de Urano, es de un pálido azulverdoso causado por su atmósfera abundante en gas metano, que absorbe la luz roja.

EL Parlamento Europeo ha adoptado una recomendación por la que exhorta a formar una comisión internacional para encauzar la investigación de humanos en fase embrionaria. En su horizonte, tiene previsto crear un cuerpo legislativo uniforme que evite el establecimiento de ''puertos francos para la experimentación genética'' en los países europeos de legislación menos rigurosa, aunque éstos la camuflen con el calificativo de avanzada o la aureolen de progreso.

Desde el primero de enero del año que viene, se abandonará el punto de ebullición del agua, cifrado en 100 grados Celsius a presión ambiente, como parámetro térmico. (Desde 1954 venía prefiriéndose la temperatura del punto triple del agua: aquella en que coexistían en equilibrio los tres estados: vapor, líquido y hielo.) Así lo ha determinado el Comité Internacional de Pesos y Medidas en su última revisión de la escala térmica internacional. La nueva escala empleará distintos medios calibradores y tendrá una gama coherente que irá desde el grado kelvin hasta más allá del punto de solidificación del oro.

La genética ha dado otro paso con la identificación, en el genoma, de la causa última de una enfermedad nerviosa. La neuropatía óptica de Leber es una enfermedad congénita que se transmite sólo por vía materna. Se produce a raíz de un cambio en un nucleótido de ADN mitocondrial —material que recibimos sólo de la madre—, que provoca la sustitución de una arginina por una histidina en una proteína respiratoria. Los que sufren esa mutación son proclives a la ceguera de ambos ojos, degeneración del nervio óptico y arritmias cardíacas.